

№ 9 ДЕКАБРЬ 2023
ISSN 2707-6989

БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
АКАДЕМИЯ АВИАЦИИ

АВИАЦИОННЫЙ ВЕСТНИК

*The aviation
herald*

THE AVIATION HERALD, 2023, no. 9

АВИАЦИОННЫЙ ВЕСТНИК. 2023. № 9

Научно-практический журнал

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИЯ В ЛИЦАХ

Славная история и новые высоты. Гражданской авиации Республики Беларусь – 90 лет 2

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Л. И. Гречихин. Удельное электрическое сопротивление при токах проводимости и токах смещения 10

О. Н. Скрыпник. Особенности и перспективы развития рынков беспилотных авиационных систем 22

А. Г. Боровой, Т. А. Тищенко, А. С. Маликов. Исследование алгоритмов расчета географических координат объекта в разностно-дальномерной системе «Чайка» 29

А. Г. Капустин, К. В. Терещенко. Компаративная оценка регуляторов параметров электрических машин на основе ПИД-законов и нечеткой логики 34

О. Н. Скрыпник, Р. А. Вишневский. Механизмы оценки безопасности интеграции беспилотных авиационных систем в общее воздушное пространство 42

А. А. Санько, А. А. Шейников. Расчет траектории беспилотного летательного аппарата, обеспечивающей максимальные значения вероятности проведения воздушной разведки 47

Ю. И. Самуленков, Д. В. Богомолов, И. С. Тоиров. Моделирование системы управления безопасностью полетов организаций разработчиков и изготовителей авиационной техники 53

А. А. Шегидевич, Е. А. Шапорова, С. О. Стойко, В. А. Котович. Моделирование лопатки ГТД для использования в системе каталитической очистки выхлопных газов 59

ЮРИДИЧЕСКИЕ НАУКИ

С. С. Чибухчян, О. С. Чибухчян, Н. Г. Мнацаканян, К. М. Изгиян. Воздушный транспорт в транспортной системе Республики Армения 64

Т. И. Довнар, И. В. Гринев. Исторические предпосылки формирования правового института обеспечения безопасности полетов в Республике Беларусь 69

ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Т. В. Казак, В. В. Шаталова. Гендерный аспект управления в системе высшего образования 76

З. В. Машарский. Иллюзии как особенности психических процессов в летной деятельности авиационного персонала 81

Т. В. Казак, А. Н. Василькова. Эргономические критерии оценки пользовательских интерфейсов программных приложений 84

*Зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь
№1951 от 20 декабря 2019 года.*

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ АВИАЦИИ»

Республика Беларусь, 220096, г. Минск, ул. Уборевича, 77
Тел. +375 (17) 378 94 22, факс (017) 271 66 32
academy@bsaa.by
bgaa.by

Главный редактор:

А. А. Шегидевич, к.т.н., ректор БГАА, Республика Беларусь.

Заместители главного редактора:

Л. И. Гречихин, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин БГАА, Республика Беларусь;

А. А. Жукова, к.т.н., Республика Беларусь.

Технический секретарь:

Е. А. Шапорова, к.х.н., заведующий аспирантурой БГАА, Республика Беларусь.

Редколлегия

Технические науки:

С. А. Чижик, академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, первый заместитель Председателя Президиума НАН Беларуси, Республика Беларусь;

А. П. Ласковнев, академик НАН Беларуси, д.т.н., главный научный сотрудник ФТИ НАН Беларуси, Республика Беларусь;

В. Г. Залесский, д.ф.-м.н., директор ФТИ НАН Беларуси, Республика Беларусь;

А. Т. Волочко, д.т.н., профессор, начальник отдела материаловедения и литейно-деформационных технологий ФТИ НАН Беларуси, Республика Беларусь;

Ю. Ю. Михальчевский, к.т.н., д.э.н., доцент, ректор ФГБОУ ВО СПбГУ ГА, Российская Федерация;

М. М. Хакдод, д.т.н., профессор, член-корреспондент Академии наук Республики Таджикистан, Республика Таджикистан;

А. Х. Гильмутдинов, помощник Президента Республики Татарстан, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой лазерных технологий ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», Российская Федерация;

Т. Л. Алибаев, к.э.н., ректор ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», заслуженный экономист Республики Татарстан, Республика Татарстан;

А. А. Рискулов, д.т.н., профессор, декан факультета международных образовательных программ Ташкентского государственного транспортного университета, Республика Узбекистан;

Ши-Хонг Джанг, д.т.н., профессор, исполнительный секретарь Китайского исследовательского объединения глубокой вытяжки металлов, профессор IMR CAS, Китайская Народная Республика;

Воонг Шин Квак, президент компании SafeUsDrone, Республика Южная Корея;

Сунь Яньпэн, д.т.н., профессор, вице-президент по иностранным делам Шэньянского аэрокосмического университета.

Юридические науки:

Б. П. Елисеев, д.ю.н., профессор, ректор МГТУ ГА, Российская Федерация;

Б. А. Сафарзода, д.ю.н., профессор, Чрезвычайный и Полномочный Посол Республики Таджикистан в Республике Беларусь, Республика Таджикистан;

В. С. Каменков, д.ю.н., профессор, профессор кафедры финансового права и правового регулирования хозяйственной деятельности юридического факультета БГУ, Республика Беларусь;

З. З. Халилов, к.ю.н., доцент кафедры правоведения НАА, Республика Азербайджан.

Педагогические науки:

Г. М. Булдык, д.пед.н., профессор, профессор кафедры физических и математических основ информатики Белорусской государственной академии связи, Республика Беларусь;

А. М. Волочко, к.фил.н., д.пед.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории гуманитарного образования НИО, Республика Беларусь.

Психологические науки:

Т. В. Казак, д.псих.н., профессор, член-корреспондент Международной академии психологических наук, заведующий кафедрой инженерной психологии и эргономики БГУИР, Республика Беларусь;

В. Г. Стуканов, к.псих.н., д.пед.н., профессор, заведующий лабораторией проблем воспитания личности НИО, Республика Беларусь;

З. В. Машарский, к.псих.н., декан факультета гражданской авиации БГАА, Республика Беларусь.

CONTENTS

AVIATION IN PERSONS

Glorious history and new heights. Civil aviation of the Republic of Belarus is 90 years old 2

TECHNICAL SCIENCES

L. Gretchikhin. Specific Electrical Resistance at Conduction Currents and Displacement Currents 10

O. Skrypnik. Features and Prospects of Market Development Unmanned Aircraft Systems 22

A. Borovoy, T. Tishchenko, A. Malikov. Research of Algorithms Calculation of the Geographical Coordinates of the Object in the Difference-Range-finder System "Chaika" 29

A. Kapustin, K. Tereshchenko. Comparative Evaluation of Regulators Electric Machine Parameters Based on Pid-Laws and Fuzzy Logic 34

O. Skrypnik, R. Vishnevsky. Mechanisms for Assessing Integration Security Unmanned Aircraft Systems in General Air Space 42

A. Sanko, A. Sheinikov. Calculation of the Trajectory of an Unmanned Aerial Vehicle Providing Maximum Values of the Probabilities of Successful Overcoming Difficult Terrain and Detecting an Air Recovery Object 47

Yu. Samulenkov, D. Bogomolov, I. Toirov. Modeling of the Flight Safety Management System of Organizations of Developers and Manufacturers of Aviation Equipment 53

A. Shegidevich, E. Shaporova, S. Stoiko, V. Kotovich. Modeling of a GTE Blade for Use in a Catalytic Exhaust Gas Cleaning System 59

LEGAL SCIENCES

S. Chibukhchyan, H. Chibukhchyan, N. Mnatsakanyan, K. Igityan. Air Transport in the Transport System of the Republic of Armenia 64

T. Dovnar, I. Grinov. Historical Prerequisites for the Formation of the Legal Institute for Flight Safety in the Republic of Belarus 69

PSYCHOLOGICAL SCIENCES

T. Kazak, V. Shatalova. Gender Aspect of Management in the Higher Education System 76

Z. Masharsky. Illusions as Features of Mental Processes in the Flight Activity of Aviation Personnel 81

T. Kazak, A. Vasilkova. Ergonomic Evaluation Criteria User Interfaces of Software Applications 84

Educational establishment
BELARUSIAN STATE ACADEMY OF AVIATION

220096, Minsk, Uborevich St., 77
Tel. +375 (17) 378 94 22, fax (017) 271 66 32
academy@bsaa.by
bgaa.by

Колонка главного редактора



**Шегидевич
Артём Артурович**

Ректор
Белорусской
государственной
академии авиации

Белорусскую государственную академию авиации можно с уверенностью назвать уникальным учреждением образования. В стенах alma-mater белорусских авиаторов воедино сливаются лучшие традиции, заложенные ветеранами отрасли, и последние достижения научно-технического прогресса.

На сегодняшний день коллектив академии авиации – команда единомышленников. Перед нами стоят амбициозные цели, главная из которых, возвращение высококвалифицированных авиационных специалистов – достойных граждан своей страны.

Выполнение столь многогранной, сложной и ответственной миссии невозможно без кропотливой работы каждого. Ежедневно руководство, профессорско-преподавательский состав и сотрудники структурных подразделений своей преданностью делу добиваются успехов. Вместе с этим свои горизонты расширяет и Белорусская государственная академия авиации.

2023 год стал для нас годом выдающихся достижений. С уверенностью можно сказать, что уходящий год навсегда войдет в историческую летопись БГАА. В июле случилось не просто значимое, а в некотором роде эпохальное событие – впервые с 1989 года на аэродром учебного авиационно-технического центра было доставлено воздушное судно. Им стал Bombardier CRJ-200LR. Воздушному судну повезло: уйдя на летную пенсию, он стал учебным пособием для курсантов, благодаря которому они смогут отрабатывать практические навыки на современных образцах авиационной техники.

С целью развития практического обучения курсантов в академии уже размещен уникальный специализированный класс по отработке навыков управления воздушным движением. Современное оборудование позволит приобретать необходимый опыт и закреплять профессиональные компетенции для обеспечения высокого уровня безопасности полетов.

Белорусская государственная академия авиации и сегодня укрепляет позиции отечественной школы подготовки авиационных специалистов, что особенно значимо в год празднования 90-летия гражданской авиации Республики Беларусь. Уверен, консолидировав богатый практический опыт и теоретические знания, мы сможем осуществлять подготовку высококвалифицированных кадров на качественно новом уровне.

СЛАВНАЯ ИСТОРИЯ И НОВЫЕ ВЫСОТЫ. ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ — 90 ЛЕТ

Авиационную отрасль, по праву, можно считать одной из самых уникальных отраслей экономики. Она объединяет в себе богатое историческое наследие, славные традиции, заложенные предыдущими поколениями авиаторов, вместе с передовыми достижениями науки и техники, а также стремлением к безграничному развитию и покорению новых высот.

Главная ценность авиации — люди. Именно благодаря вкладу каждого из нас ежедневно выполняются сложные, ответственные и многогранные задачи, крепнет уровень авиационной безопасности и безопасности полетов, находят практическое исполнение амбициозные идеи. Кроме всего прочего, общими усилиями работники авиационной отрасли выполняют главную задачу — соединяют людей сквозь тысячи километров.

На протяжении богатой истории становления отечественной гражданской авиации белорусские специалисты одни из первых внедряют новые методы работы, апробируют технологии, эксплуатируют новейшие образцы авиационной техники, изучают и используют в работе передовые методы технического обслуживания воздушных судов.

Современный мир стремительно изменяется, однако фундаментальными остаются нерушимые ценности, которые имеет честь оберегать каждый из нас. Авиатор — гордое звание, и представители авиационной отрасли выступают наглядным тому подтверждением. Сегодня усилиями авиационного сообщества обеспечивается дальнейшее поступательное развитие транспортного комплекса и реализуются амбициозные задачи.

В 2023 году гражданская авиация Республики Беларусь отметила свое 90-летие. В честь этой знаменательной даты мы решили поговорить о жизненных путях, авиации и мечтах тех авиаторов, которые носят звание руководителей и акцентировать внимание на преемственности поколений: тесной связи прошлого и будущего.



Логотип «90 лет гражданской авиации Республики Беларусь»

Своими историями и взглядами поделились директор Департамента по авиации Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь **Игорь Владимирович Голуб**, генеральный директор республиканского унитарного предприятия «Национальный аэропорт Минск» **Вячеслав Васильевич Хоронко**, генеральный директор открытого акционерного общества «Авиакомпания «Белавиа» **Игорь Николаевич Чергинец**, а также директор открытого акционерного общества «Авиакомпания Трансавиаэкспорт» **Юрий Вячеславович Хлебус**.

– В авиационной отрасли нет случайных людей: в ней работают только те, для кого авиация выступает синонимом к слову «жизнь». Расскажите, пожалуйста, с чего все начиналось: какова история Вашего профессионального пути? Есть ли необычные истории, связанные с Вашим становлением в качестве руководителя?

Игорь Голуб: Ни для кого не секрет, что я был назначен на должность директора Департамента по авиации Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь уже после того, как завершил службу в Вооруженных Силах Республики Беларусь. Им я отдал более 38 лет: выполнял полеты на самолетах истребительной, штурмовой авиации; занимал различные руководящие должности в авиации Вооруженных Сил.

Мой профессиональный путь начался еще со школьной скамьи в городе Чернигов. В свое время там существовало прославленное в СССР Чернигов-



Игорь Владимирович Голуб — директор Департамента по авиации Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь

ское высшее военно-авиационное училище летчиков имени Ленинского комсомола. Город был областной, соответственно, одноклассники были детьми офицеров, преподавателей, летчиков. После окончания 8-го класса я решил, что свяжу свою жизнь с авиацией. Особенно повлияло на это решение то, что часто мы с друзьями гуляли около домов, которые находились недалеко от взлетно-посадочного курса аэродрома Певцы (*прим. ред.: аэродром ЧВВАУЛ, на котором летчики-курсанты 4-го курса выполняли полеты на МиГ-23*).

Так и сложилось, поступил в училище. Срок обучения тогда был 4,5 года. В 1988 году окончил училище летчиком-истребителем. Службу начал в городе Щучин в гвардейском истребительном авиационном полку, далее стал летчиком штурмовой авиации, выполнял обязанности заместителя командира 927-й истребительной авиационной базы Военно-воздушных сил Республики Беларусь. После этого был назначен командиром 206-й штурмовой авиабазы. Закончил службу в должности командующего Военно-воздушными силами и войсками противоздушной обороны Вооруженных Сил Республики Беларусь.

Помнится несколько ярких событий, связанных с военной службой. Например, будучи молодым лейтенантом в 21 год при назначении в воинскую часть я стал командиром экипажа. Когда меня представляли моему экипажу, технику в звании капитана было 43 года, а механику — порядка 35 лет. «Вот твой экипаж, вот твой техник, вот твой механик — воспитывай. Все от тебя зависит» — и я, будучи молодым парнем, стал «руководить». Адаптация проходила спокойно: на всех местах есть начальники и подчиненные. За все успехи или неудачи подчиненного отвечает руководитель. Хорошо прошел по службе — значит руководитель и экипаж молодцы. Поэтому важно было сразу выстроить определенные рамки. Вне службы может быть дружеское отношение, а в рамках службы — свои границы и уважение. Практически всегда из-за этих принципов было полное взаимопонимание с моими подчиненными, была одна команда, нацеленная на выполнение общих, стоящих задач.

Одно из других ярких событий — назначение на должность командира авиационной эскадрильи в 27 лет. За моими плечами было 100 человек подчиненных. На эту должность я был назначен самым молодым кандидатом, а прослужил, без малого, 10 лет. Нельзя не отметить и назначение на должность заместителя Командующего ВВС и войсками ПВО — начальника авиации. Казалось бы, поступил на факультет Генерального штаба Военной академии Республики Беларусь, всего год отучился, как было принято решение о совмещении учебы уже в заочном формате с работой на столь ответственной должности.

Через четыре месяца после завершения военной службы и увольнения в запас руководство страны предложило возглавить Департамент по авиации. Понимая, какое это ответственное направление, я дал согласие на назначение. Признаюсь, работа очень интересная, важная и немного отличается от привычной ранее. Если раньше я занимался вопро-

сами обороноспособности нашей страны, защитой воздушных рубежей, то сейчас основное направление — развитие гражданской авиации, начиная с подготовки кадров, чем занимается Белорусская государственная академия авиации, заканчивая укреплением позиций авиационных организаций на международном поле. В непростых условиях авиационное сообщество делает все для того, чтобы гражданская авиация в этот период времени только получала дальнейшее поступательное развитие.

Вячеслав Хоронек: Жизнь свела меня с авиацией и, в частности, с Национальным аэропортом Минск, можно сказать незапланированно, но, наверное, вовсе не случайно. Чего стоит только тот факт, что свои дни рождения с аэропортом мы отмечаем в один день — 1 июля.



Вячеслав Васильевич Хоронек — генеральный директор РУП «Национальный аэропорт Минск»

А вообще, мое первое знакомство с аэропортом произошло в далеком 1983 году, тогда еще в качестве пассажира. Кстати, опять-таки, волей судьбы я оказался одним из первых пассажиров аэропорта Минск-2, который теперь мы знаем как Национальный аэропорт Минск. Регистрацию проходили в Минск-1, а далее на автобусах следовали в Минск-2, откуда и вылетали в нужном направлении. Думал ли я тогда, что спустя годы буду руководить сначала аэропортом Минск-1, а впоследствии возглавлю и главный авиатранспортный узел нашей страны?

Вернемся к восьмидесятым. На тот момент я, выпускник Самаркандского высшего военного автомобильного командного училища, связал свою жизнь с Вооруженными Силами, где проходил службу до 1993 года. Здесь также можно сделать маленькое уточнение, на службе мне приходилось сталкиваться с авиацией — военной, но все же авиацией. После увольнения из Вооруженных Сил и переезда в Минск я попал в гражданскую авиацию. Прошел свой профессиональный путь, от рядового работника до руководителя. За это время удалось познать и открыть действительно много нового и интересного. Мир авиации — это всегда что-то особенное.

Так, за годы трудовой биографии в крылатой отрасли накопился нужный опыт, который, несомненно, помогает мне сегодня на должности генерального директора.

Получается, если 30 лет назад я вошел в авиацию, то сейчас авиация крепко-накрепко вошла в мою жизнь.

Игорь Чергинец: Сегодня авиация — мое все. Однако, в юности я не думал, что свяжу жизнь именно с этой сферой. Я очень хотел пойти по стопам отца — Николая Ивановича, который служил в милиции и получил звание генерал-лейтенанта. Я тоже видел себя сотрудником уголовного розыска, собиравшись поступать в Минскую высшую школу Министерства внутренних дел СССР. Но обстоятельства сложились иначе, и я выбрал компромиссный вариант: стал юристом, потом получил образование в сфере авиации.



Игорь Николаевич Чергинец — генеральный директор ОАО «Авиакомпания «Белавиа»

Мне часто говорят, что я работаю в авиакомпании с первого дня ее основания. Это одновременно так и не совсем так. Официально Авиакомпания «Белавиа» была учреждена 5 марта 1996 года, но ее предшественником было Белорусское объединение гражданской авиации. Получается, я пришел в отрасль за год до официального рождения компании, и прошел все карьерные ступеньки. Я считаю авиакомпанию единственным местом работы, в которое вкладывал и не перестану вкладывать душу.

Юрий Хлебус: Моя история проста. У меня в семье не было авиаторов, я не был воспитан военными. Тем не менее, с детства я был привержен дисциплине и порядку. Исходя из этого и рассматривал направления. Одно понимал точно, что я хочу связать свою судьбу с теми, кому дана честь носить форму. Выбор пал на авиацию, и одним из учебных заведений как раз был Минский государственный высший летно-технический колледж (*прим. ред.: ныне — Белорусская государственная академия авиации*). Он мне и приглянулся. Действительно, манила опре-

деленная романтика, но мне были важны также и подходы к дисциплине и порядку. К тому же я, как иногородний человек из Бреста, хотел быть самостоятельным: воспитать это качество в себе.



Юрий Вячеславович Хлебус — директор ОАО «Авиакомпания Трансавиаэкспорт»

Курсантские годы запомнились. Они дали тот стержень, позволяющий человеку быть дисциплинированным, ответственным и, наверное, готовым к вызовам, которые ставит перед тобой современность. Преподаватели оставили свой след в каждом курсанте, конечно, и во мне. Они дали ту базу, которую приходится использовать и сейчас на должности руководителя авиакомпании. Я понимаю многое как специалист с теоретической базой, подкрепленной настоящей практикой. Порой где-то что-то забываю: приходится вспоминать, почитать.

— Авиация — это весь алфавит от «А» до «Я». Для каждого человека это слово таит в себе сакральный смысл. Что оно значит для Вас?

Игорь Голуб: В свое время далекий от авиации человек произнес фразу: «Там, где начинается авиация, заканчивается порядок». Опровергая данное высказывание, я бы хотел привести пример. Для обычных наблюдателей все может казаться хаотичным, но в авиации действуют жесткие регламенты и стандарты. «Обывателю» кажется, что при той же подготовке воздушного судна к вылету все разрознено: разные службы, разные машины, разные люди. Одновременно происходит заправка топливом, техническое обслуживание, подготовка систем, и потом раз — пилоты запустили двигатели и самолет пошел на взлет. Однако это не так. В авиационной отрасли все работает автономно и в то же время сплоченно. Каждый знает фронт работ, требования к безопасности, технологической дисциплине. Итогом становится четкий, слаженный механизм.

Для меня первое, что приходит в голову, когда я слышу слово «авиация», — это слово «семья» с ремаркой, что она подчинена своим законам. И эти законы в авиации вырабатываются с курсантских лет:

азы у нас в стране получают в академии авиации. Молодые люди понимают, что только в нашей и никакой другой отрасли существует тройной контроль. Это значит, что, например, специалист выполнил свою задачу, второй проверил, а третий проконтролировал двоих. Безопасность пассажиров и тех, кто на земле превыше всего.

От каждого в нашей семье зависит результат и каждый работает на его выполнение. Всю свою сознательную жизнь я нахожусь в этой семье и выполняю те задачи, которые передо мной стоят. Для меня, как для руководителя, важно то, что я после себя оставляю. Я был летчиком-инструктором, руководителем, командиром. Главное, что уже мои ученики, которых я ставил на крыло, сейчас руководят и командуют воинскими частями, другими организациями. Пожалуй, самое приятное в моей работе — осознание того, что было сделано и оставлено после себя.

Вячеслав Хоронко: Ответ на это уже есть в первом вопросе. Для меня авиация синоним жизни. Наверное, никого этим не удивлю. Авиация — такой мощный магнит, который притягивает к себе миллионы людей по всему миру: профессионалов, любителей, пассажиров, да и всех, кто влюблен в небо. Авиация — это одновременно романтика, красота, колоссальная ответственность и нелегкий труд.



Торжественное открытие первого рейса авиакомпании AZAL из Баку в Минск, 2 октября 2023 года

Как руководитель в аэропорту я, безусловно, провожу достаточно много времени: общаюсь с работниками, наблюдаю за работой техники, присматриваюсь к пассажирам, их впечатлениям. Сегодня можно без преувеличения отметить: авиация в целом, и, в частности, аэропорт и все, что с ним связано, занимает преимущественную часть моей жизни. Действительно, можно сказать — это все и есть моя жизнь. Горжусь тем, что причастен к нашей большой авиационной семье.

Игорь Чергинец: Для любого человека, который влюблен в свое дело, оно будет являться смыслом жизни. Я умышленно делаю акцент на том, что для меня авиация — это не работа, а дело всей жизни, в которое я поистине влюблен. Мой смысл жизни — «Белавиа».



Воздушное судно ОАО «Авиакомпания «Белавиа»
Боинг 737-8 EW-528PA

Юрий Хлебус: Как и было сказано, авиация — жизнь от «А» до «Я». Для нас она и есть смысл жизни. О ней нужно думать каждую минуту. Более того, эта отрасль накладывает груз ответственности, вызовы, которые опять же заставляют задуматься. Авиация требует от нас определенных резервов, ресурсов и заставляет быть готовым на любые решения.

В то же время авиационная отрасль значит постоянное развитие, стремление к новым высотам. Здесь вспоминается Белорусская государственная академия авиации. Приятно наблюдать за тем, что подрастающее поколение не просто желает поступить в учреждение образования, но и мотивирует себя, проходя определенный конкурс. Дорога в мир авиации не проста. По ней идет тот, кто стремится быть с нами, горит небом, имеет определенную базу для того, чтобы дальше развиваться, а не просто прийти и сказать: «Я в авиации».

— В этом году гражданская авиация Республики Беларусь встретила свое 90-летие. За этот промежуток сделано многое, но в то же время перед нами стоят амбициозные задачи. Как по Вашему мнению отечественная гражданская авиация встретит свой 100-летний юбилей?

Игорь Голуб: Отрезок в 10 лет (особенно в авиации) — большой промежуток времени. Каждый год у нас происходит смена обстановки, в которой мы находимся и работаем. Никто не мог подумать, что в 2019 году, когда гражданская авиация Республики Беларусь была на серьезном подъеме, нам вставят палки в колеса.

Самое главное, что на момент 90-летия мы удержали тот уровень развития, который достигла авиация Беларуси. В тех условиях, в каких мы встречали эту дату, нам удалось сохранить имеющийся потенциал: начиная с педагогического, нарастающая возможность в вопросах обучения и подготовки наших специалистов, заканчивая уровнем авиационных организаций и, в целом, отрасли. Нам удалось сохранить лучшее не просто затормозив негативные процессы, давление — мы начали двигаться поступательно. Перспектива будет хорошая, с учетом того, что у нас отличная молодежь, нацеленная на выполнение задач, которые мы ставим, наличие хорошего

коллектива профессионалов, наставников, развитие техники.

Хочется отметить, что вопрос по программе авиационного строительства не стоял так актуально, как в досанкционный период. Сейчас перед нами с российскими коллегами стоят глобальные планы: мы обязательно получим авиационную технику, оборудование, которое будет конкурентоспособно и не будет зависеть от санкций.

На 100-летие гражданской авиации Республики Беларусь многие будут смотреть уже как ветераны, вспоминая, как говорили о больших перспективах, и радуясь, что отрасль выйдет на новые высоты. Мечта одна, пусть она и комплексная — расширение нашего парка воздушных судов, открытие новых направлений, выход национальной школы подготовки авиационных специалистов на международный уровень. Сейчас сделан хороший задел, он приобретет свой потенциал и будет идти по четкому механизму, и мы опять будем летать во все уголки света и через нас будут летать все. Вектора намечены — будем их развивать.

Вячеслав Хоронко: С уверенностью могу сказать одно — 100-летний юбилей отечественная гражданская авиация встретит точно. И встретит его достойно, как и проходила весь свой путь.

Сегодня мы продолжаем дело наших предшественников. За все эти годы сделано так много, вложено столько человеческих и материальных ресурсов, что мы попросту не имеем права останавливаться и что-то терять, упускать время или тратить его на раздумывания, как же нам быть в непростое время.



Здание терминала РУП «Национальный аэропорт Минск»

Не секрет, что уже четыре года мы работаем в совершенно нестабильных, иной раз непредсказуемых, условиях. 2020 год существенно отразился на деятельности мировой гражданской авиации, и, естественно, сильно «ударил» по нам. А затем последовали еще и различные санкционные ограничения. Подстраиваться под новые реалии приходилось много. Но справились, работаем! Мы, действительно, можно сказать, выстояли. Теперь опыта у нас столько, что работать готовы практически при любых обстоятельствах. Не просто работать, а развиваться и со-

вершенствоваться. В общем, готовы двигаться вперед и только вперед, к новым вершинам. Говорю это не без доли гордости. И это не только про Нацаэропорт, это про нашу отечественную гражданскую авиацию.

Надеюсь, что к 100-летию юбилею мы уже реализуем часть новой архитектурной концепции развития Национального аэропорта Минск и представим в совершенно новом облике. Ведь и нам, и миллионам наших пассажиров это будет уже необходимо.

Не сомневаюсь, к этому моменту наши ряды пополнятся подрастающим поколением — продолжением нынешних авиаторов, и новичками, выбравшими делом своей жизни авиацию. Трудовых династий в крылатой отрасли немало. Будет замечательно, если они продолжатся, а для кого-то и начнутся. Молодые авиаторы — это наш потенциал, наше будущее, новое свежее дыхание в нашем деле.

Игорь Чергинец: Сейчас такое время, что строить прогнозы на 10 лет вперед — неблагоприятное занятие. Недавнему юбилею авиации предшествовало немало событий — внезапных, требующих быстрых и нетривиальных решений. Сначала вмешалась пандемия с закрытием границ и отменой рейсов, большими финансовыми потерями. Позже мы попали под серьезные санкционные ограничения. Все это, разумеется, сказалось на экономических показателях отрасли. Но мы вступаем в новый год, и я, как любой человек, безусловно, верю в лучшее.



Воздушное судно ОАО «Авиакомпания «Белавиа»
Боинг 737-800 EW-457PA

Юрий Хлебус: Все удивляются, как же сейчас существует авиация. Безусловно, в нынешних условиях результатами мы довольны, но в то же время нам есть, куда стремиться. Коллектив авиакомпании работает над этим, и я считаю, что с самоотдачей. Авиаторы видят вызовы и готовы дать адекватную реакцию на них.

Авиация — это про качество. Отечественные авиационные специалисты всегда неразрывно были с ним связаны, а к столетию, думаю, мы только укрепим и без того передовые позиции. Я думаю, что свои 100 лет авиация встретит с достоинством, как это и должно быть. Мне хочется, чтобы к этому времени у нас в стране потребность в перевозке грузов из других стран иностранными авиакомпаниями отсутствовала. Уверен, что совместными усилиями авиационного сообщества мы достигнем этого показателя.



Воздушное судно ОАО «Авиакомпания Трансавиаэкспорт» Боинг 747-300 EW-465TQ

– У каждого человека есть свои мечты, которые, зачастую, перерастают в цели. Пожалуй, большую часть времени мы мечтаем об успехах в своем деле. Поделитесь, пожалуйста, своей самой сокровенной «авиационной» мечтой.

Игорь Голуб: Мечта каждого человека — сделать так, чтобы за тобой остались люди, которым ты что-то дал, которых ты воспитал и которые сделают больше, чем ты достиг в жизни. Каждый руководитель выстраивает свою стратегию развития коллектива, и самая главная моя мечта именно в этом.

Вячеслав Хоронко: Давайте назовем ее «открытые горизонты». Мне бы очень хотелось, чтобы настало то время, когда любой человек вне зависимости от материального положения, гражданства, вероисповедания или политических взглядов смог позволить себе полет, открыть для себя другой мир, почувствовать и ощутить вкус неба. Пусть доступность авиатранспорта станет на порядок выше, без препятствий, непреодолимых условий и нерациональных ограничений.

Открытые горизонты могли бы позволить всем нам развиваться: кому-то исполнять свои мечты, кому-то путешествовать и добираться в самые дальние уголки земного шара. А для авиапредприятий и компаний это такой огромный стимул и возможность для реализации своих грандиозных планов и смелых мыслей.

Мечты становятся реальностью, когда мысли превращаются в действия. Знаю, что в авиации многие мечтают о чем-то подобном и прикладывают свои усилия, для того, чтобы это стало реальностью. Скажу больше, меня окружают такие люди.

Игорь Чергинец: Думаю, мечты меняются вместе с человеком. В детстве, как я уже говорил, очень хотел пойти по стопам отца. Кроме того, что он был успешен в своей профессии, он еще профессионально играл в первенстве СССР по футболу. Как тут не захотеть стать милиционером или футболистом? Об этом и мечтал. Его дело, получается, не повторил, но именно отец подтолкнул меня к другому — необходимости с полной отдачей относиться к делу, которым ты занимаешься.

Самую сокровенную мечту озвучивать не стану: она ведь сокровенная. Но поделюсь основными желаниями и целями, которые несу с собой через всю жизнь и стараюсь вести себя так, чтобы они исполнились. По крайней мере там, где от меня что-то зависит. Первое — чтобы было хорошо моей семье, моим близким людям; чтобы они жили в достатке, были здоровы. Второе — поступать так, чтобы, несмотря на определенные ошибки, которые есть у каждого человека, совесть оставалась спокойной.

Юрий Хлебус: Моя «авиационная» мечта заключается в том, чтобы Республика Беларусь стала одним из центров в авиационном мире. Это было бы правильно. Сегодня авиационная семья состоит из большого количества предприятий, к тому же геополитическое положение страны — центр Европы. Для реализации этой цели у нас есть все!

От авторов

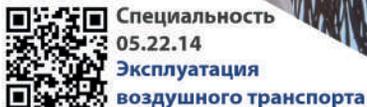
В заключение хотелось бы отметить, что авиационная отрасль Республики Беларусь сегодня действительно справляется со всеми трудностями и консолидирует успехи каждого в одну большую победу. Каждый член авиационной семьи чувствует свою причастность к общему делу. Сегодня в отрасли трудятся настоящие профессионалы, а молодежь активно дополняет колоссальный опыт новыми идеями и страстью к их реализации. Уверены, что в будущем гражданскую авиацию Республики Беларусь ждут выдающиеся достижения!

Материал подготовлен начальником пресс-службы БГАА С. А. Хилькевич, специалистом пресс-службы БГАА Д. О. Шпилевским



Аспирантура Эксплуатация воздушного транспорта

Аспирантура академии авиации – это кузница научных кадров высшей квалификации: исследователей и преподавателей авиационной отрасли.



Специальность
05.22.14
Эксплуатация
воздушного транспорта

Научная квалификация «Исследователь»

Аспирантура является уровнем научно-ориентированного образования и направлена на подготовку специалистов, обладающих:

- ✓ навыками планирования;
- ✓ самостоятельностью проведения научных исследований;
- ✓ глубокими теоретическими знаниями.

Обучение в аспирантуре

- ✓ углубленное изучение общеобразовательных и специальных дисциплин;
- ✓ сдача установленных кандидатских экзаменов и зачетов (для обучающихся в форме соискательства);
- ✓ овладение методами и средствами научных исследований;
- ✓ выполнение научных исследований по актуальным темам;
- ✓ систематизация и обобщение полученных результатов.

Период обучения

- ✓ в дневной форме – 3 года;
- ✓ в заочной форме – 4 года;
- ✓ в форме соискательства – 5 лет.

Преимущества получения образования

- ✓ рост уровня образования;
- ✓ саморазвитие и личностное развитие;
- ✓ развитие критического мышления;
- ✓ расширение спектра возможностей для карьерного роста;
- ✓ возможность преподавать в учреждении высшего образования или работать в науке;
- ✓ возможности для исследований своих собственных теорий или работы над перспективными проектами;
- ✓ получение признания международного сообщества.

Требования к кандидатам

- ✓ высшее образование;
- ✓ склонность к научным исследованиям, что подтверждается научными публикациями, участием в научно-исследовательских и инновационных проектах, конференциях или другими материалами;
- ✓ рекомендация ученого совета учреждения высшего образования или факультета этого учреждения (для поступающих в год окончания обучения в данном учреждении) либо опыт практической работы не менее 2 лет на должностях, требующих наличия высшего образования.

**Приглашаем будущих
лидеров отрасли!**

**220096, Республика Беларусь, г. Минск,
ул. Уборевича, 77, кабинет 1105,
тел.: +375 17 249-97-65**



ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

LES

УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРИ ТОКАХ ПРОВОДИМОСТИ И ТОКАХ СМЕЩЕНИЯ

SPECIFIC ELECTRICAL RESISTANCE AT CONDUCTION CURRENTS AND DISPLACEMENT CURRENTS

Леонид Иванович Гречихин – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
gretchihin@yandex.ru

Leonid Gretchikhin – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Natural Science and General Professional Disciplines of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
gretchihin@yandex.ru

Аннотация: выявлены противоречия в определении электрического тока и удельного сопротивления. Показано, в каком направлении следует уточнить существующие определения электрического тока и удельного сопротивления. Электрический ток в полупроводниках следует рассматривать не как *n*- и *p*-проводимость, а как ток проводимости и ток смещения. Установлено, что ток проводимости с температурой изменяется по экспоненциальному закону, а ток смещения – по линейному закону. При температуре плавления для кристаллов объемноцентрированных и гранецентрированных структур удельное сопротивление вследствие образования двухатомных молекул возрастает ровно в два раза. В жидком состоянии с образованием трехатомных молекул реализуются три случая: 1) при существенном отличии температуры плавления от температуры кипения удельное сопротивление линейно возрастает; 2) при незначительном отличии температуры плавления от температуры кипения удельное сопротивление сначала падает, а затем резко возрастает (кадмий и цинк); 3) в промежуточном случае, когда отличие температуры плавления от температуры кипения несущественно, возникает линейное уменьшение удельного сопротивления с ростом температуры (магний).

Ключевые слова: электрический ток, удельное сопротивление, отрицательные ионы, кластер, твердое тело, жидкость, плавление, кипение.

Abstract: contradictions in the definition of electric current and resistivity are revealed. It is shown in which direction the existing definitions of electric current and resistivity should be clarified. Electric current in semiconductors should be considered not as *n*- and *p*-conductivity, but as conduction current and displacement current. It has been established that the conduction current changes exponentially with temperature, while the displacement current changes linearly. At the melting temperature for body-centered and face-centered structures, the resistivity increases exactly twofold due to the formation of diatomic molecules. In the liquid state with the formation of triatomic molecules, three cases are realized: 1) with a significant difference between the melting temperature and the boiling point, the resistivity increases linearly; 2) with a slight difference in the melting temperature from the boiling point, the resistivity first falls, and then sharply increases (cadmium and zinc); 3) in the intermediate case, when the difference between the melting temperature and the boiling point, but not significantly, then a linear decrease in resistivity occurs with increasing temperature (magnesium).

Keywords: electric current, resistivity, negative ions, cluster, solid, liquid, melting, boiling.

Введение

В электротехнике считается, что «электрический ток в металлах возникает под действием электрического поля, которое вызывает упорядоченное движение электронов». При этом полагают, что носителями тока в металлах являются валентные электроны, которые не принадлежат определенному атому. Отсюда следует, что кристаллическая структура металлов формируется ионной решеткой, положительный заряд которой нейтрализуется свободными электронами. На основании таких представлений разработана классическая теория

прохождения электрического тока свободными электронами Друде – Лоренца, а затем уточнена Зоммерфельдом с применением квантовой теории [1]. Электрический ток рассматривался как движение почти свободных электрических зарядов и математически представлялся в виде

$$i = \frac{dq}{dt}. \quad (1)$$

Такое наглядное определение электрического тока позволило четко выяснить его возникновение в разного рода электрических разрядах, в электролизе, в термоэмиссии, в автоэлектронной эмиссии и др.

В металлах все электроны пребывают в связанном состоянии вследствие взаимодействия с положительно заряженной кристаллической решеткой и не являются свободными. Поэтому проводить анализ электрических свойств металлов на основе модели свободных электронов просто некорректно. Нужны другие подходы.

Когда в жидких металлах были обнаружены наноразмерные кластерные частицы, а внутри кристалла относительная плотность частиц в кластере соответствует упаковке 0,68–0,74 при относительной плотности упаковки свободных частиц вещества в межкластерных объемах 0,44–0,47 [2], то стало ясно, что кристаллы представляют собой неоднородную структуру по плотности и формируются взаимодействием кластерных частиц [3–6]. Поэтому модель свободных электронов в металлах не отражает реальных электрических свойств кристаллических тел. В этой связи Максвелл полагал, что электрический ток возникает двух видов: ток проводимости и ток смещения. Ток проводимости определяется направленным движением свободных электрических зарядов, а ток смещения – тангенциальной напряженностью электрического поля, создаваемой приложенной внешней разностью потенциалов. Никола Тесла полагал, что не свободные электроны, а электромагнитные волны, формируемые генератором, переносят энергию в разных средах. В случае металлов электромагнитные волны проникают на глубину скинслоя и полностью отражаются. Поэтому в металлах электрический ток возникать не должен. Однако металлические проводящие электрический ток проводят и достаточно эффективно. При этом экспериментально установлено, что электрический ток распространяется в металлах только по поверхности.

На поверхности металлов в земной атмосфере образуются оксидные слои, которые совместно с поверхностным слоем основного материала являются хорошим диэлектриком. В диэлектриках свободных электронов не существует, следовательно электромагнитные волны по поверхности металлов распространяются без существенного поглощения. Поэтому идеи Максвелла и Теслы получили право на адекватное представление физики протекания электрического тока в разных средах. Как это происходит в полупроводниках с примесями детально рассмотрено в работе [7], в которой показано, что относительную магнитную проницаемость в полупроводниках с примесями можно приравнять к единице. В металлах ситуация более сложная. Для металлов внутри кристалла диэлектрическая и магнитная проницаемости обладают огромными значениями. Необычные свойства присущи только поверхностному слою.

Экспериментально установлено, что удельное сопротивление, а, следовательно, и общее электрическое сопротивление многих проводников линейно возрастает с ростом температуры [8]. Это свойство проводников до настоящего времени остается неясным. На практике электрическое сопротивление в зависимости от температуры представляют разными эмпирическими формулами.

В этой связи возникла цель: детально разработать теорию распространения токов проводимости и токов смещения на новых физических принципах с учетом строения твердых тел на наноразмере.

Для достижения сформулированной цели необходимо решить следующие задачи:

- рассмотреть общий принцип строения твердых тел на наноразмере;
- обосновать распространение электрического тока в полупроводниках и проводниках;
- создать адекватную теорию формирования удельного сопротивления в проводниках;
- установить зависимость удельного сопротивления от температуры в разных агрегатных состояниях.

Строение твердого тела на наноразмере

Строение всех веществ в разных агрегатных состояниях следует рассматривать на атомном, молекулярном и кластерном уровнях с использованием квантовой физики, основанной на решении уравнения Шредингера. Шредингер записал свое знаменитое уравнение, основываясь на идеях Луи де Бройля. Чтобы электрон в атоме, находясь в стационарном состоянии и обладая центростремительным ускорением, не излучал или не поглощал энергию волн де Бройля, эти волны на круговой орбите должны формировать стоячую волну. Это приводит к тому, что атом из одного стационарного состояния в другое переходит не непрерывно, а дискретно, т. е., возникает квантование электронных состояний в атомах. Квантование энергетических состояний также следует из условия нормировки волновых функций атомных стационарных состояний, которые определяются уравнением Шредингера. Когда получают стационарные состояния в виде вытянутых орбит, то представляют их относительно ядра атома, а не относительно круговой орбиты волны де Бройля, что невозможно. Кроме того, взаимодействие разных орбит стационарных состояний приводит к неравномерному распределению электронной плотности относительно ядра атома. Это явление в сложных атомах обуславливает возникновение встроенного дипольного электрического момента, квантовомеханический расчет которого впервые был предложен Коулсоном [9] и в первом приближении теоретически разработан в [10].

В сложных атомных системах каждое стационарное состояние определяется энергией ионизации, а эффективная волновая функция по Слейтеру [11–13] представляется в виде S -состояния с эффективным зарядом ядра и эффективным главным квантовым числом. В [14] проведено уточнение главного квантового числа и энергий взаимодействия между атомами в бинарном приближении с учетом ковалентной, ионной, наведенной, электрон-дипольной, диполь-дипольной связи и взаимного отталкивания ядер разной степени ионизации. На этой основе разработана общая теория образования молекул, которая детально изложена в [15]. Было показано, что в двухатомных молекулах встроенные дипольные электрические моменты направлены взаимно противоположно. Определены: межатомное расстояние, энергия связи, эффективный радиус и энергия ионизации нейтральной и однократно ионизированной молекулы.

Образованию трехатомных молекул посвящена работа [16]. Показано, что под влиянием третьего атома в двухатомной молекуле встроенные дипольные электрические моменты направлены произвольно, т. е. возникает аллотропия в расположении дипольных электрических моментов с формированием в центре

молекулы положительного или отрицательного заряда. Определены: энергия разрыва связи, эффективный радиус молекулы и энергия однократной и двукратной ионизации.

Взаимодействие двухатомных или трехатомных молекул приводит к образованию кластерных структур. Кластерные образования формируют твердые тела. Твердые тела внутри содержат кристалл, который создается объемными кластерами, а на поверхности образуется поверхностная пленка, структура которой определяется взаимодействием поверхностных кластеров.

Поверхностный слой кристалла возникает вследствие взаимодействия двухатомных или трехатомных молекул на плоскости. Примерный вид двухатомной молекулы из разных атомов показан на рисунке 1, *a*, а из одинаковых атомов на рисунке 1, *г*. Промежуточный поверхностный кластер из разных атомов показан на рисунке 1, *б*, а для одинаковых атомов — на рисунке 1, *д*. Основной поверхностный кластер из двухатомных молекул формируется промежуточными кластерами, которые показаны на рисунках 1, *в* и 1, *е* соответственно. Образование кластеров из двухатомных молекул осуществляется в два этапа. Сначала образуется промежуточный кластер для разных (рисунок 1, *б*) или одинаковых (рисунок 1, *д*) атомов, а затем промежуточные кластеры формируют основной кластер (рисунок 1, *в*, *е*).

Поверхностный кластер из трехатомных молекул (рисунок 2, *a*) образуется, минуя промежуточную стадию (рисунок 2, *б*).

Характерная особенность поверхностных кластеров из трехатомных молекул (рисунок 2, *б*) состоит в том, что такой кластер состоит как бы из двух слоев: внешнего и внутреннего, которые содержат по шесть молекул. Каждая молекула внутреннего слоя взаимодействует с двумя ближайшими, а во внешнем слое молекулы с одинаковыми зарядами в центре взаимодействуют друг с другом.

Кристаллическое состояние поверхности возникает в процессе взаимодействия между поверхностными кластерами с образованием поверхностной кластерной решеточной структуры.

Кластерная решеточная структура поверхности, создаваемая двухатомными молекулами из разных атомов (рисунок 3, *a*), обладает пустотами крестообразной формы, а создаваемая одинаковыми атомами (рисунок 3, *б*) — пустотами в виде окружности. В кластерной решеточной структуре поверхности из трехатомных молекул (рисунок 3, *в*) образуются пустоты шестиугольной формы. При этом кластеры как бы сцепляются друг с другом. Полученные кластерные решеточные структуры проявляются только на поверхности кристаллических тел.

Подробно сканирующим туннельным микроскопом была экспериментально исследована поверхность кремния Si(111) [17], а также поверхность индия после напыления на поверхность кремния. Результаты приведены на рисунке 4. Теоретически полученная структура

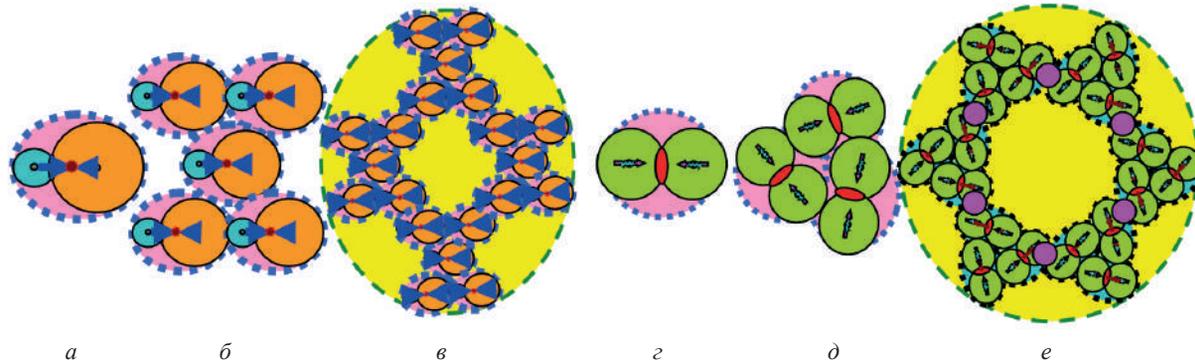


Рисунок 1 — Двухатомная молекула из разных атомов (*a*); промежуточный кластер из разных атомов (*б*); основной кластер из двухатомных молекул разных атомов (*в*); двухатомная молекула из одинаковых атомов (*г*); промежуточный кластер из одинаковых атомов (*д*); основной кластер из двухатомных молекул одинаковых атомов (*е*)

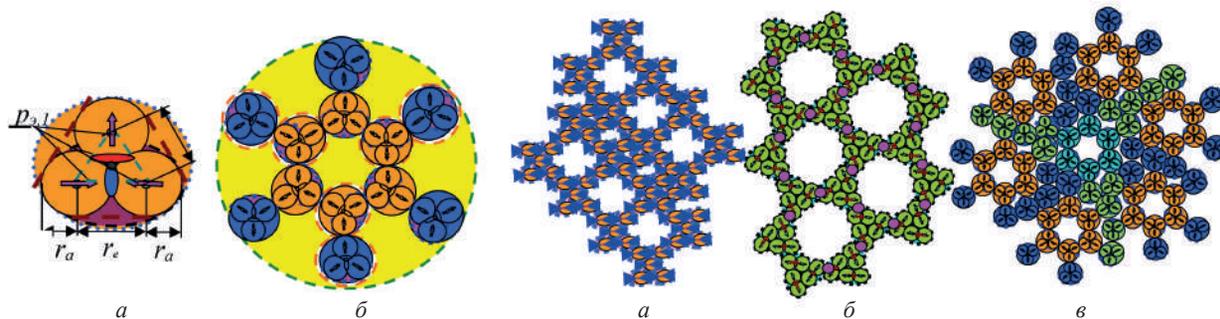


Рисунок 2 — Трехатомная молекула (*a*) и кластер из трехатомных молекул (*б*)

Рисунок 3 — Кластерная решеточная структура на плотноупакованной поверхности: *a* — из двухатомных молекул с разными атомами; *б* — из двухатомных молекул с одинаковыми атомами; *в* — из трехатомных молекул

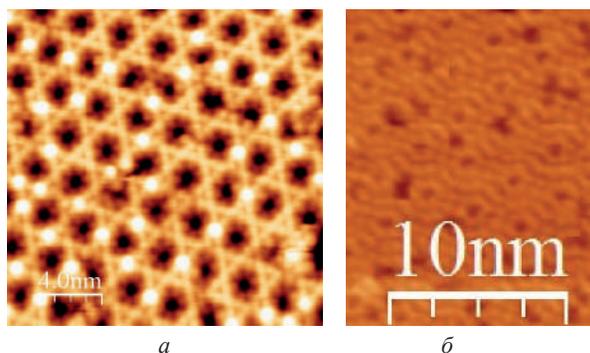


Рисунок 4 — Экспериментальные данные:

a — кластерная решеточная структура поверхности индия на поверхности кремния; *б* — кластерная решеточная структура поверхности кремния

поверхности в первом и во втором случаях полностью совпала с экспериментально измеренной.

Образование поверхностных кластерных структур приводит к залячиванию микронеоднородностей основного материала. Поэтому это явление используется для упрочнения конструкционных металлических деталей.

Кристаллы формируются объемными кластерами, которые плотно стыкуются друг с другом. Объемные кластеры возникают вследствие взаимодействия молекул. Внутреннюю структуру кристалла исследуют с помощью рентгеноструктурного анализа. Рентгеновское излучение проникает на большую глубину кристалла, и происходит его рассеяние на отдельных атомах. В результате кластерные структуры не фиксируются, а определяется внутреннее расположение отдельных атомов внутри кристалла. Кристаллические структуры исследуются кристаллографией. В кристаллических структурах возникают межкластерные пустоты сферической, щелевидной и столбообразной формы [4]. Кластер объемноцентрированного кристалла (ОЦК) представляет собой четырехгранную бипирамиду, а гранецентрированный кристалл (ГЦК) — трехгранную бипирамиду. Дипольные электрические моменты атомов в кристаллах располагаются так, что происходит их полная компенсация.

В кластерной решеточной структуре ГЦК возникают пустоты $4,05r_{kl}$, $3r_{kl}$, $1,5r_{kl}$, $0,5r_{kl}$, $0,3092r_{kl}$, а в структуре ОЦК — $3,63r_{kl}$, $1,5r_{kl}$, $0,4142r_{kl}$ (r_{kl} — радиус кластера, определяется из размеров постоянной решетки). Пустоты $4,05r_{kl}$, $3r_{kl}$ и $0,3092r_{kl}$ структуры ГЦК, а также пустоты $3,63r_{kl}$ и $0,4142r_{kl}$ структуры ОЦК обладают сферической формой. Остальные пустоты имеют щелевидную или столбообразную форму. Преимущественно возникают пустоты сферической формы минимального размера $0,3092r_{kl}$ структуры ГЦК и $0,4142r_{kl}$ структуры ОЦК. В таких пустотах в свободном состоянии пребывает только один атом, что было проверено на моделях структур ОЦК и ГЦК [4].

При плотной упаковке кластерных структур в твердом теле молекулы внутри кластеров распадаются на отдельные атомы с коллективным взаимодействием между атомами. При этом каждый атом взаимодействует с атомами ближайшего окружения, которое является первым координационным слоем. В кристаллах

возникает взаимодействие атомов со вторым и даже с третьим координационным слоем. Если температурное возмущение не превышает энергию связи атома с третьей координационной сферой, то кристалл в этой области является строго однородным и поэтому превращается в сверхпроводник. При этом возникает плотноупакованная структура с исчезновением кластеров. Распад кластеров при низких температурах с образованием конденсированного состояния экспериментально доказан в [18].

До температуры плавления все металлы являются проводниками. При этом удельное электрическое сопротивление с ростом температуры линейно возрастает. При температуре плавления удельное сопротивление возрастает скачком и кристалл превращается в жидкость. В жидком состоянии начинают формироваться молекулы. Тепловая энергия частиц вещества в жидком состоянии при температуре кипения соответствует энергии распада основных и даже промежуточных кластерных структур из двухатомных молекул, а кластерные структуры из трехатомных молекул распадаются на основные кластерные образования.

При переходе из жидкого состояния в твердое на поверхности под воздействием сил поверхностного натяжения молекулы создают плотноупакованную молекулярную структуру, а внутри твердого тела происходит образование кристалла, в котором происходит распад объемных кластеров на отдельные атомы [19].

При очень низких температурах, когда энергия связи каждого атома с атомами третьей координационной сферы превышает энергию теплового движения (в твердом теле это колебания относительно положения равновесия), реализуется плотноупакованное состояние [20]. В таких условиях разрыв связи каждого атома с атомами третьей координационной сферы внутри кристалла не происходит. Образуется однородная структура с переходом металла в диэлектрик, и перенос энергии электромагнитного поля осуществляется со скоростью света по всему кристаллу, т. е. возникает сверхпроводимость¹. Это известный экспериментальный факт [7, 8].

При температуре плавления происходит распад связи каждого атома с атомами второй координационной сферы с образованием двухатомных и даже трехатомных молекул. При температуре выше температуры плавления в жидком состоянии образуются свободные атомы, которые, взаимодействуя между собой, формируют двухатомные и трехатомные молекулы. При температуре кипения возникает полный разрыв связи атомов с первой координационной сферой с образованием молекул, промежуточных кластерных структур и основного кластера для двухатомных молекул (см. рисунок 1, б, в, д, е). В случае образования трехатомных молекул образуются только основные кластеры (см. рисунок 2, а). Например, кристалл индия формируется двухатомными молекулами. Экспериментально установлено, что при напылении индия на поверхность кремния осаждаются промежуточные кластеры из двухатомных молекул с одинаковыми атомами. Эти кластеры при температуре вблизи кипения не взаимодействуют друг с другом, поэтому интенсивно испаряются с поверхности. Основной кластер также испаряется, но, обладая

¹Образование сверхпроводимости «Куперовскими парами» неправомерно, т. к. электроны в металлах свободные, а такие электроны спином не обладают и в принципе не могут формировать «Куперовские пары».

большой массой, покидает жидкость с малой скоростью и поэтому практически не достигает поверхности, на которую производится напыление. На рисунке 4, а экспериментально измеренная поверхность индия полностью соответствует теоретически рассчитанной, приведенной на рисунке 3, б.

Внутри кристаллов ниже температуры плавления кластеры образуют кластерную решеточную структуру. Поскольку энергия связи между атомом и вторым координационным слоем при температуре плавления разрывается, то с учетом закона Дюлонга и Пти энергия бинарной связи атома с атомом второй координационной сферы в кристалле равна

$$E_m = \frac{3k_b T_m}{e}, \quad (2)$$

где k_b – постоянная Больцмана;
 T_m – температура плавления;
 e – заряд электрона.

Энергия связи отдельных атомов внутри кристалла с атомами первой координационной сферы определяется по формуле

$$E_b = \frac{3k_b T_b}{e}, \quad (3)$$

где T_b – температура кипения.

Значение этих энергий для ряда металлов приведены в таблице.

При уменьшении температуры газообразного состояния происходит процесс образования молекул. Затем взаимодействие между молекулами приводит к образованию кластеров. При плотном взаимодействии кластеров образуется кристаллическое твердое тело. В кристаллической структуре исчезают кластеры на отдельные молекулы и возникает коллективное взаимодействие между атомами. Рентгеновское излучение

позволяет фиксировать только связанные атомы внутри кристалла. Свободные атомы в межкластерных объемах не фиксируются. На свободных атомах рентгеновское излучение не рассеивается, поэтому они не видны.

Экспериментальные данные по энергиям плавления и кипения (сублимации) известны и получены в расчете на одну мольную массу. В формулах (2) и (3) температура плавления и кипения не зависят от массы частиц нагретого вещества. Поэтому в дальнейшем целесообразно энергию связи между атомами внутри кристалла определять в соответствии с температурой плавления и кипения.

Учитывая динамику формирования разных агрегатных состояний вещества, рассмотрим, что происходит при распространении электромагнитного потока энергии внутри и на поверхности разных металлов.

Протекание электрического тока по поверхности и внутри металла

При наложении внешнего электрического поля на металл возникает электрический ток. Экспериментально удельное сопротивление при прохождении электрического тока измеряется для образцов в форме таблеток диаметром $d = 1$ см и толщиной от $l = 1$ мм до $l = 5$ мм. Принципиальная схема измерения показана на рисунке 5. В качестве источника напряжения используют ЭДС 10 – 12 В, а переменным сопротивлением R_x добиваются того, чтобы напряжение на исследуемой таблетке было равно одному вольту, а электрический ток в цепи I_a измерялся амперметром. Результирующее сопротивление R_0 есть отношение U/I_a . Полагая, что электрический ток течет по всей площади таблетки, получают удельное сопротивление путем умножения R_0 на площадь таблетки и деления на толщину таблетки. Полученные результаты в нормальных условиях вошли во все справочники

Таблица – Исходные данные для расчета удельного сопротивления

ПАРАМЕТРЫ	Материал							
	Ni	Cu	Pb	Zn	Al	Fe	Ag	Na
E_b/E_m	0,794/ 0,447	0,728/ 0,351	0,522/ 0,155	0,305/ 0,108	0,793/ 0,241	0,813/ 0,468	0,631/ 0,319	0,300/ 0,0959
$\rho \cdot 10^8, \text{ Ом} \cdot \text{м}$	6,14	1,55	19,20	5,65	2,50	8,60	1,49	4,28
$\varepsilon_r \cdot 10^{-6}$	4,884	3,650	0,024	0,278	1,412	0,120	4,001	0,485
$p_e \cdot 10^{30} \text{ Кл} \cdot \text{м}$	2,643/ 0,010	2,120/ 1,080	6,760/ 4,280	19,100/ 11,140	3,410/ 1,930	16,095/ 8,334	38,000/ 0,120	3,067/ 1,640
$r_{a,b}, \text{ \AA}$	2,5040	2,6860	2,8638	2,4784	2,8638	2,4855	2,8920	3,0770
$\Delta, \text{ \AA}$	3,520	3,610	4,060	2,860	4,050	2,870	4,090	4,673
$\Theta_p, \text{ эВ}$	7,6370	7,6264	7,4167	9,3943	5,9858	7,9024	7,5760	5,1390
Z^*	0,8559	0,9319	0,9406	0,7861	0,7532	0,9399	1,0160	0,7940
$\varepsilon_{ps}, \text{ эВ}$	2,077	1,721	3,068	4,821	1,734	3,015	2,509	1,577
$\Delta\Theta, \text{ эВ}$	1,720	2,05	2,05	2,593	1,180	2,089	2,558	1,098
$\Delta E, \text{ эВ}$	0,357	–0,308	1,018	2,228	0,554	0,926	–0,049	0,479
$r_{kp}, \text{ \AA}$	3,0727	3,8400	5,2500	4,1100	4,2900	3,7800	3,6590	4,008
$D, \text{ эВ}$	2,400	2,050	0,625	1,180	2,000	1,300	1,700	0,750
$E_{\phi^2}, \text{ эВ}$	0,473	0,372	–0,041	0,120	0,357	0,154	0,270	–0,005

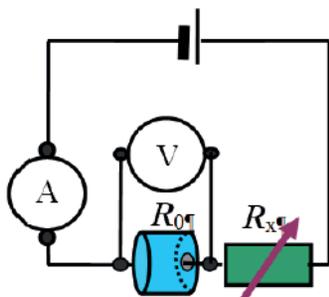


Рисунок 5 – Схема измерения удельного сопротивления

по электрофизическим свойствам материалов. Какие величины электрического тока возникали в цепи остаются неясным.

Результаты выполненных измерений удельного сопротивления по схеме, показанной на рисунке 5, для некоторых металлов представлены на рисунке 6 [8].

Удельное сопротивление металлов линейно возрастает с ростом температуры. При температуре плавления для большинства металлов возникает увеличение удельного сопротивления скачком примерно в два раза, а для ртути – почти в пять раз. Тангенсы угла наклона до точки плавления и после точки плавления несколько отличаются для разных металлов. Для некоторых веществ (например, цинк, графит и др.) удельное сопротивление после плавления уменьшается с ростом температуры.

Тепловое расширение твердых тел с учетом их кластерного строения рассмотрено в [5], и установлена слабая зависимость от температуры. Поэтому тепловое расширение не должно влиять на изменения удельного сопротивления металлов. Наведенная диэлектрическая проницаемость металлов при тепловом воздействии зависит от температуры и определяется следующим образом [21]:

$$\varepsilon_{r,1} \cong 1 + \frac{n_a p_s^2}{3\varepsilon_0 k_b T}, \quad (4)$$

где n_a – концентрация свободных электрических моментов;

p_s – встроенный дипольный электрический момент отдельного атома.

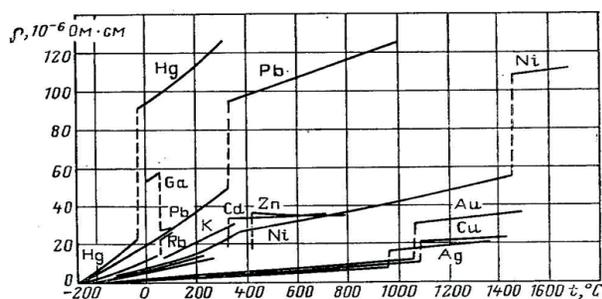


Рисунок 6 – Зависимость удельного сопротивления ряда металлов от температуры [8]

Диэлектрическая проницаемость металлов в электрическом поле осуществляется путем ориентации свободных дипольных электрических моментов и установления их вдоль приложенного внешнего электрического поля. Тогда наведенная диэлектрическая проницаемость под действием внешнего электрического поля составит [21]

$$\varepsilon_{r,2} \cong \frac{n_a p_s}{\varepsilon_0 E_\tau}. \quad (5)$$

В формуле (5) концентрация атомов определяется количеством малых межкластерных пустот, которые заполнены атомами при температуре вблизи абсолютного нуля. Когда энергия связи с третьей координационной сферой полностью разорвана, атомы внутри малых межкластерных пустот являются свободными. Встроенный дипольный электрический момент есть свойство атомной системы. При заданном приложенном напряжении на металл диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{r,2}$ есть свойство металла и от температуры не зависит. При температуре $T = 273$ К и приложенном электрическом напряжении $E_\tau = 10^3$ В/м отношение $\varepsilon_{r,1}/\varepsilon_{r,2} = 24/(3,54 \cdot 10^7)$. Следовательно, наведенная температурная поляризация для металлов пренебрежимо мала по сравнению с наведенной электрической поляризацией.

Под воздействием внешнего электрического поля возникает как температурная, так и ориентационная поляризация. Ориентационная поляризация обусловлена вращением встроенных дипольных электрических моментов свободных атомов или трехатомных молекул в межкластерных пустотах вдоль приложенного электрического поля. При этом температурная поляризация нарушает ориентационную поляризацию. При образовании двухатомных молекул встроенные электрические моменты атомов взаимно компенсируются, и диэлектрическая проницаемость резко падает.

Электрический ток проводимости и ток смещения

Электрический ток проводимости и ток смещения переносят энергию. Поэтому эти токи требуют тщательного анализа.

Ток проводимости определяется движением электрических зарядов. При этом электрические заряды должны быть свободными. Внутри кристалла все электроны связаны с положительно заряженной кристаллической решеткой и не являются свободными, а на поверхности атомы, которые обладают сродством к электрону, могут находиться в виде отрицательных ионов и под действием приложенного внешнего электрического поля и температуры могут ионизоваться и поставлять свободные электроны в поверхностный слой. Под действием приложенного внешнего поля свободные электроны начнут двигаться вдоль приложенного электрического поля, и возникнет электрический ток проводимости величиной

$$\vec{I} = \vec{j}S = e \cdot n_e \cdot \vec{v}_e \cdot S, \quad (6)$$

где e – заряд электрона;

n_e – концентрация электронов;

v_e – подвижность электронов в поверхностном слое;

S – площадь сечения поверхностного слоя.

Концентрация электронов проводимости на основании закона Максвелла – Больцмана с учетом приложенного внешнего электрического поля равна [7]

$$n_e = n_0 \cdot \exp \left[-\frac{E_A}{k_b T} \left(1 - \frac{e^2 (2E_s r_a)^2}{(E_A)^2} \right) \right], \quad (7)$$

где n_0 — концентрация атомов данного элемента (или примеси) в поверхностном слое;

E_A — энергия срoдства к электрону;

E_s — напряженность внешнего приложенного электрического поля;

r_a — радиус атома, обладающего срoдством к электрону.

Подвижность свободных электронов в поверхностном слое составит:

$$\bar{v}_e = \sqrt{\frac{2eE_s r_a}{m_e}}. \quad (8)$$

На основании рассмотренной модели определим величину тока проводимости при протекании по алюминиевой таблетке диаметром 1 см и толщиной 3 мм, на которую приложено напряжение $U = 1$ В. Кристалл алюминия обладает гранецентрированной структурой [8], кластеры которой формируются трехатомными молекулами (см. рисунок 3, в) [5, 6]. Внутри кристалла электроны находятся в электрическом поле положительно заряженной решетки и поэтому не участвуют в создании тока проводимости.

Распределение электронов по энергиям получено путем рассеяния рентгеновского излучения L_3 -полосы и K -полосы. В этом распределении определена ширина запрещенной зоны и положение уровня Ферми. Теория этого распределения разработана в [5] и уточнена в [6]. Результаты эксперимента и теоретического расчета приведены на рисунке 7. Теоретический расчет позволил установить ширину зоны проводимости и величину уровня Ферми от дна зоны проводимости.

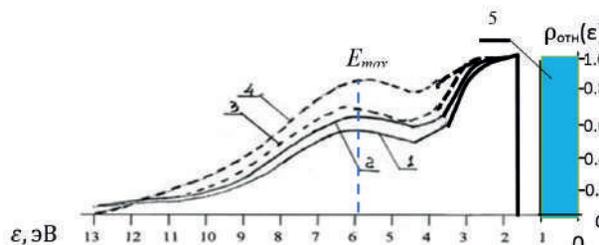


Рисунок 7 — Распределение электронов по энергиям внутри кристаллической решетки алюминия:

- 1 — теоретический расчет;
- 2 — теоретический расчет с учетом П-образного аппаратного уширения шириной 0,05 эВ;
- 3 — экспериментальное распределение из L_3 -рентгеновской полосы;
- 4 — из K -рентгеновской полосы;
- 5 — зона проводимости, полученная теоретически

Атомы алюминия обладают срoдством к электрону с энергией 0,44 и 0,33 эВ. В результате интенсивного обмена все атомы алюминия в поверхностном слое будут пребывать в виде отрицательных ионов, т. к. потенциал ионизации атома алюминия совпадает с максимумом функции распределения электронов в кристалле. Эта ситуация была экспериментально обнаружена туннельным микроскопом и описана в [17]. Свободные электроны возникают вследствие ионизации отрицательных ионов алюминия. Их количество определяется

экспоненциальным членом в формуле (7). Для атомов алюминия в кристалле $r_0 = 1,43 \text{ \AA}$ [8]. Соответственно $n_0 = 1/8r_0^3 \cong 4,3 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ и при стандартной температуре $T = 295 \text{ К}$ количество свободных электронов составит $n_e = 1,76 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$, подвижность $v_e = 333 \text{ м/с}$. Тогда общий ток проводимости, который течет только по боковой поверхности таблетки, с учетом плотности заполнения поверхности атомами алюминия равен $I = 37 \text{ мкА}$.

Таблетки из металлов производят в стандартных условиях. Поэтому на их поверхностях образуются оксиды. Оксиды по столбообразным пустотам проникают внутрь кристалла. В результате возникает полное заполнение атомами алюминия всей поверхности. Тогда результирующий ток проводимости составит $I = 84 \text{ мкА}$.

Для медной таблетки аналогичный расчет дает значение тока проводимости $I = 1,6 \cdot 10^{-26} \text{ А}$, т. е. практически ноль. Это обусловлено тем, что срoдство к электрону у атомов меди составляет 1,23 эВ. Энергия срoдства для атомов серебра 1,30 эВ. Аналогичная ситуация будет иметь место и для серебра.

Для тока проводимости зависимость от приложенного внешнего электрического поля весьма сложная, и поэтому закон Ома не выполняется. Так как закон Ома установлен экспериментально, то для тока проводимости следует записать равенство

$$U = R_{eff} I, \quad (9)$$

где коэффициент R_{eff} является сопротивлением проводника и должен в каждом конкретном случае определяться экспериментально, а это уже нелинейные электрические цепи.

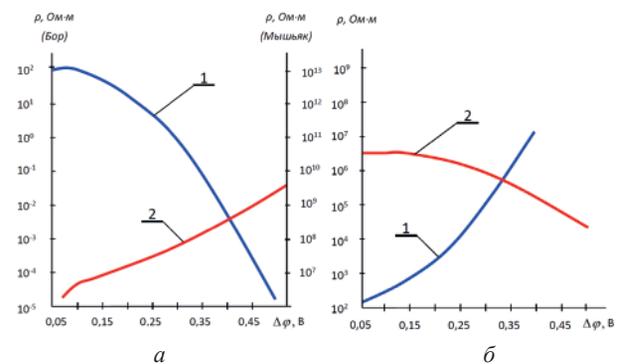


Рисунок 8 — Характеристика проводимости образцов кремния с примесью бора (1) определяет ток проводимости,

а с примесью мышьяка (2) — ток смещения:

a — напряженность внешнего электрического поля направлена от валентной зоны к зоне проводимости;

b — напряженность внешнего электрического поля направлена от зоны проводимости к валентной зоне

Кремний с внедрением бора приобретает проводимость, свойственную металлам, при внешнем электрическом поле в направлении от валентной зоны к зоне проводимости, когда разность потенциалов в контакте бор-кремний достигает приблизительно 0,5 В. Кремний с внедрением мышьяка металлическую проводимость приобретает при разности потенциалов в контакте мышьяк-кремний приблизительно 1,1 — 1,2 В. В первом случае возникает ток проводимости, а во втором случае — ток смещения.

На рисунке 8 приведена теоретически рассчитанная зависимость удельного сопротивления кремния с примесью бора и мышьяка [22]. Из рисунка 8 следует, что чем меньше энергия сродства вводимой примеси, тем существеннее изменяется удельное сопротивление в зависимости от величины приложенного внешнего электрического поля. По мере увеличения приложенного электрического поля примесная проводимость стремится к линейному спаду или возрастанию удельного сопротивления в логарифмическом масштабе по оси ординат, т. е. более четко реализуется экспоненциальная зависимость удельного сопротивления от приложенного внешнего электрического поля [22].

Ток смещения. По Фарадею энергию переносят не электрические заряды, а электрическое поле, которое создают электрические заряды. Изменение электрического поля сопровождается возникновением магнитного поля, которое также является носителем энергии. В совокупности оба поля взаимосвязаны и формируют электромагнитное поле. Перенос энергии электромагнитным полем определяется вектором Пойнтинга²

$$\vec{P} = [\vec{E} \cdot \vec{H}], \quad (10)$$

где \vec{E} — напряженность электрического поля;
 \vec{H} — напряженность магнитного поля.

В отсутствие зарядов на основании уравнения Лоренца в электромагнитной волне напряженность электрического поля связана с напряженностью магнитного поля следующей зависимостью:

$$\vec{E} = [\vec{v} \cdot \vec{B}] = \mu_0 \mu_r [\vec{v} \cdot \vec{H}]. \quad (11)$$

Здесь $v = 1/\sqrt{\epsilon\mu} = c/\sqrt{\epsilon_r\mu_r}$ — скорость распространения электромагнитных волн в среде с заданной диэлектрической ($\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$) и магнитной ($\mu = \mu_0\mu_r$) проницаемостью. В свою очередь ϵ_r и μ_r являются относительной диэлектрической и магнитной проницаемостью, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м и $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м по Зоммерфельду есть абсолютная диэлектрическая и магнитная проницаемость вакуума. Скорость света в вакууме с этими проницаемостями связана следующим образом:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0\mu_0}}. \quad (12)$$

При распространении электромагнитной волны вдоль проводника электрическое поле у поверхности проводника имеет тангенциальную и нормальную составляющие. Тогда вектор Пойнтинга приобретает вид

$$\vec{P} = [\vec{E}_t \vec{H}] + [\vec{E}_n \vec{H}], \quad (13)$$

где E_t и E_n — составляющие напряженности электрического поля вдоль проводника и составляющие нормальное к его поверхности;

H — напряженность магнитного поля.

Первое слагаемое обусловлено протеканием тока смещения и определяет закон Джоуля — Ленца и закон Ома, а второе слагаемое определяет перенос энергии электромагнитного поля вдоль проводника [7] по его поверхности. Так как плотности энергии электриче-

ского и магнитного поля равны, то из (13) следует, что на поверхности проводника $E_t = E_n$. Поэтому результирующая напряженность электрического поля электромагнитной волны по отношению к поверхности проводника направлена под углом 45° . Чтобы энергия электромагнитного поля не выходила в окружающую среду, угол 45° должен быть предельным. Тогда из закона преломления света показатель преломления равен

$$n_1 = \frac{1}{\sin 45^\circ} \cong 1,414.$$

Таким значением показателя преломления обладает фторопласт-4. Поэтому этим диэлектриком тонким слоем покрывается большинство монтажных проводков.

После изготовления монтажных плат их покрывают лаком, основу которых составляет полиметилметакрилат, обладающий показателем преломления приблизительно 1,49. Предельный угол для такого показателя преломления составляет около 42° . Излучение, которое относительно поверхности направлено под углом 45° , не выходит за пределы такого диэлектрика. Это позволяет резко уменьшать разогрев самих плат и объема, на котором они расположены.

Для разводки электропередачи в зданиях применяются алюминиевые провода в диэлектрической оплетке из полиэтилена, у которого показатель преломления составляет приблизительно 1,52. Предельный угол для такого диэлектрика составляет 41° . При падении волны под углом 45° реализуется полное внутреннее отражение. Потери на выход излучения в окружающую среду полностью отсутствуют.

Для оксидных слоев большинства металлов показатель преломления больше 1,5. Поэтому по металлическим проводам электроэнергия передается без особых потерь. Учитывая это обстоятельство, рассмотрим прохождение электрического тока величиной I по измеряемому образцу в форме таблетки. При прохождении электрического тока вдоль таблетки напряженность магнитного поля $H = I/2\pi r$, а тангенциальная составляющая напряженности электрического поля $E_t = (\phi_1 - \phi_2)/l$. Тогда равенство (11) преобразуется к виду

$$\phi_1 - \phi_2 = \sqrt{\frac{\mu_0\mu_r}{\epsilon_0\epsilon_r}} \cdot \frac{rl}{2\pi r^2} \cdot I, \quad (14)$$

где r — радиус таблетки.

Линейная связь напряжения и электрического тока в проводнике установлена Омом и является законом Ома. Следовательно, закон Ома справедлив только для токов смещения. На основании (14) при распространении электромагнитных волн по металлической таблетке для тангенциальной составляющей удельное сопротивление равно

$$\rho = \sqrt{\frac{\mu_0\mu_r}{\epsilon_0\epsilon_r}} \cdot \frac{r}{2}. \quad (15)$$

Удельное сопротивление прямо пропорционально корню квадратному из относительной магнитной проницаемости ($\sqrt{\mu_r}$) и обратно пропорционально корню квадратному из диэлектрической проницаемости среды ($\sqrt{\epsilon_r}$), а также пропорционально $\sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120\pi$ — так называемому «волновому сопротивлению вакуума» и

² Задолго до Пойнтинга профессор Одесского университета Умов показал, что поток энергии, переносимый упругой волной, равен произведению плотности энергии волны на ее скорость распространения. Из вектора Умова вектор Пойнтинга следует автоматически.

линейному размеру проводника. Относительная магнитная и электрическая проницаемости формируются соответствующими дипольными моментами. Для ферромагнетиков следует учитывать как электрическую, так и магнитную проницаемости, которые могут быть разными. Для парамагнетиков обе относительные проницаемости примерно равны, а для диамагнетиков относительную магнитную проницаемость в первом приближении можно положить равной единице.

В равенстве (15) от температуры зависят две величины: относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости, которые возникают при электрической и температурной поляризации. Под действием электрического поля встроены дипольные электрические моменты выстраиваются вдоль поля только свободных атомов или молекул внутри кристаллических тел, а температурная поляризация эту связь разрушает.

В (15) наведенная относительная диэлектрическая проницаемость среды определяется по формуле (5). Наведенная относительная магнитная проницаемость внутри металлов находится по значению энергии Ферми, как это показано в работе [7]. Что касается поверхности, то относительная магнитная проницаемость равна единице, т. к. отсутствуют дипольные магнитные моменты в поверхностной структуре.

Поскольку металлическая пластина тонкая, а электромагнитные волны проникают без потерь на глубину скинслоя, то удельное сопротивление можно определять по формуле (15). Например, для алюминия дипольный электрический момент $p_s = 7,33 \cdot 10^{-30}$ Кл·м вычислен по методике, разработанной в [10], а концентрация малых межкластерных пустот соответствует концентрации атомов в кристалле. Для алюминия $n_a = 1/8 r_a^3 = 4,275 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$. Алюминий является парамагнетиком. В парамагнетике атомы обладают как электрическими, так и магнитными моментами. Электромагнитное поле распространяется в среде со скоростью

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \text{ или } \epsilon_r \mu_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2.$$

В парамагнетике скорость распространения электромагнитного поля существенно не отличается от скорости распространения в вакууме. Поэтому можно положить, что

$$\mu_r \approx \frac{1}{\epsilon_r}.$$

Тогда по формуле (5) при толщине таблетки $l = 3$ мм и падении напряжения на таблетке 1 В наведенная эффективная диэлектрическая проницаемость поверхностного слоя равна $\epsilon_r = 1,063 \cdot 10^8$, а удельное сопротивление $8,86 \cdot 10^{-9}$ Ом·м. Если толщину таблетки алюминия уменьшить до 1 мм, то удельное сопротивление возрастет и составит $2,66 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Табличное значение, измеренное на установке (рисунок 5), равно $\rho(\text{Al}) = 2,5 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

Аналогичный расчет для меди и серебра при $l = 3$ мм получаем соответственно значения $\rho(\text{Cu}) = 1,58 \cdot 10^{-8}$ Ом·м и $\rho(\text{Ag}) = 1,49 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Имеет место совпадение теоретически рассчитанного значения с экспериментальными данными.

Важно определить величину электрического тока смещения. В соответствии с (14) электрический ток с использованием удельного сопротивления равен

$$I = \frac{U \cdot S}{\rho \cdot l}. \quad (16)$$

Применительно к установке (рисунок 5) электрический ток смещения при подаче напряжения на таблетку также как и для тока проводимости в 1 В равен

$$I = 1,378 \cdot 10^6 U. \quad (17)$$

При таком напряжении ток смещения на десять порядков больше тока проводимости. Поэтому в металлах электрический ток является только током смещения.

Зависимость удельного сопротивления металлов от температуры

Удельное сопротивление для металлов определяется по формуле (15). Когда на таблетку подавалось напряжение при температуре $T = 0$ °С, то полученная величина удельного сопротивления определялась только электрической поляризацией, которая от температуры практически не зависит. Магнитная и электрическая поляризации определяются величиной относительной проницаемости, которые связаны между собой взаимной зависимостью. Для парамагнетиков (металлы никель, медь, серебро, алюминий, свинец и др.) $\mu_r \approx 1/\epsilon_r$. Тогда удельное сопротивление (15) преобразуется к виду

$$\rho \approx \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cdot \frac{1}{\epsilon_r} \cdot \frac{r}{2}. \quad (18)$$

Измерения удельного сопротивления на установке (см. рисунок 5) осуществлялись в нормальных условиях. Температура поддерживалась постоянной. Удельные сопротивления, которые приведены в справочниках, были выполнены при температуре $T_0 = 273$ К. Например, для алюминия при этой температуре получено значение $\rho = 2,5 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. При других температурах в удельном сопротивлении при неизменном приложенном напряжении диэлектрическая проницаемость ϵ_r равна $\epsilon_{r,1}$ и определяется по формуле (4). При достаточно высоких температурах в формуле (4) единицей можно пренебречь, и удельное сопротивление в общем виде равно

$$\rho_T \approx \frac{120 \cdot \pi \cdot r}{2} \cdot \frac{3\epsilon_0 \cdot k_b \cdot T}{n_a \cdot P_s^2}. \quad (19)$$

В формуле (19) при повышении температуры может происходить изменение концентрации свободных атомов и значения их дипольного электрического момента. Для отдельных атомов и молекул встроены дипольный электрический и магнитный моменты не зависят от температуры и являются постоянными величинами. Для некоторых парамагнетиков и особенно ферромагнетиков при сравнительно малых температурах может происходить самопроизвольное объединение дипольных магнитных моментов и соответственно электрических моментов с образованием доменов с огромным дипольным магнитным и электрическим моментом. В этом случае домены определяют удельное сопротивление твердого тела, которое резко уменьшается обратно пропорционально квадрату дипольного магнитного и электрического моментов домена. С повышением температуры домены разрушаются и удельное сопротивление возрастает в квадратичной зависимости

от температуры. Такое повышение удельного сопротивления должно происходить до температуры Кюри, при которой домены полностью разрушаются.

Для всех твердых тел, не обладающих спонтанной намагниченностью, удельное сопротивление при температуре T по отношению к его значению при температуре $T_0 = 273$ К на основании (19) определяется как

$$\rho_T = \alpha \cdot \rho_{T_0} \cdot \frac{T}{T_0}. \quad (20)$$

Такая зависимость была обоснована путем обработки экспериментальных данных [7, 8], но без учета изменения концентрации атомов и, соответственно, встроенного дипольного электрического момента, т. е. без учета коэффициента α .

Тангенс угла наклона полученной линейной зависимости определяется концентрацией свободных атомов и их квадратом дипольного электрического момента в межкластерных малых пустотах. Тогда коэффициент α учитывает какое количество атомов в межкластерных малых пустотах исключаются из общего взаимодействия своими дипольными моментами при наложении внешнего электрического поля.

Если исследуемое вещество обладает спонтанной намагниченностью, то с возрастанием температуры до уровня температуры Кюри внутренний результирующий магнитный момент и, соответственно, электрический момент будут ослабляться вследствие разрушения доменов и наведенных электрических диполей приложенным внешним электрическим полем, что приведет к уменьшению результирующего дипольного электрического момента и, следовательно, к возрастанию удельного сопротивления.

При отсутствии спонтанного намагничивания в интервале температур от 273 К до температуры плавления вследствие разрыва энергии связи электрических диполей под действием приложенного внешнего электрического поля удельное сопротивление будет уменьшаться. При температуре выше температуры плавления малые межкластерные объемы открываются, и все атомы в них становятся свободными. Начинается быстрое формирование двухатомных и даже трехатомных молекул. У двухатомных молекул результирующий дипольный электрический момент равен нулю, а в трехатомных молекулах встроенный дипольный электрический момент может быть больше, чем у атома. Тогда удельное электрическое сопротивление выше температуры плавления должно определяться взаимодействием преимущественно электрических диполей трехатомных молекул с внешним приложенным электрическим полем и их концентрацией. В результате может оказаться, что результирующее наведенное удельное сопротивление по мере увеличения температуры может уменьшаться, что и наблюдается на опыте для металлов цинка, кадмия и магния (см. рисунок 8).

Увеличение числа атомов в межкластерных объемах с уменьшением дипольного электрического момента определяется изменением коэффициента α следующим образом:

$$\alpha = 1 - \int_{E_0}^{\infty} f(E, T) dE, \quad (21)$$

где $f(E, T) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{E}{k_b T} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E}{k_b T}\right)$ — функция распределения по энергиям Максвелла — Больцмана;

E_0 — максимальное значение энергии частиц в рассматриваемом интервале температур.

Расчет коэффициента α выполняется по формуле (21) последовательно в интервале температур от 273 К до температуры Кюри, затем от температуры Кюри до температуры плавления твердого тела T_m и окончательно от температуры плавления T_m до температуры кипения T_b . Температура Кюри для никеля составляет $T_c = 627$ К, для железа — $T_c = 1044$ К, для кобальта — $T_c = 1388$ К [8]. Структура кристалла для никеля — гранецентрированная, для железа — объемноцентрированная, а для кобальта при высоких температурах — гранецентрированная [8]. Дипольные электрические и магнитные моменты атомов никеля, железа и кобальта имеют достаточно близкие значения. Это способствует их эффективному взаимодействию. Поэтому при температурах ниже температуры Кюри электрические и магнитные моменты компенсируют друг друга. При этом образуются домены, в которых результирующий электрический и магнитный моменты несвободные, поэтому электрический ток стремится к нулю. В результате при низких температурах никель, железо и кобальт электрический ток не проводят. При температуре 0 °С вследствие ослабления энергии диполь-дипольного взаимодействия в межкластерных объемах возникают свободные дипольные магнитные и электрические моменты. Вероятность возникновения свободных электрических и магнитных моментов определяется по (21), и в этих условиях начинает возникать электрический ток. Результаты теоретических расчетов удельного сопротивления для никеля, железа и кобальта, также как для ряда металлов, у которых спонтанное намагничивание отсутствует, приведены на рисунке 9.

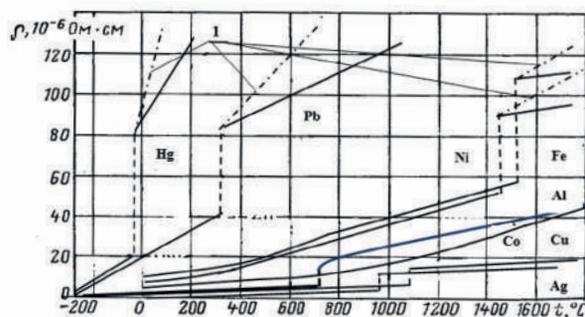


Рисунок 9 — Теоретический расчет удельного сопротивления ряда металлов: 1 — зависимость без учета образования трехатомных молекул

Сравним теоретически рассчитанные удельные электрические сопротивления с данными эксперимента, приведенными на рисунке 6.

При температурах выше температуры плавления происходит разрыв связи с первой координационной сферой, и возникают свободные атомы. В результате взаимодействия свободных атомов с двухатомными молекулами образуются свободные трехатомные молекулы. Трехатомные молекулы обладают встроенным дипольным электрическим моментом несколько большим, чем у атомов. На рисунке 2, б это хорошо видно по расположению электрических моментов атомов внутри трехатомной молекулы. Поэтому на

основании зависимости (19) удельное сопротивление должно уменьшаться. Такая тенденция проявляется для веществ, у которых температура плавления и кипения не очень сильно отличаются. Это имеет место для атомов цинка, кадмия и магния. Сразу после температуры плавления, вследствие разрыва связи с первой координационной сферой, в расплаве появляются большое количество атомов и мгновенно образуются трехатомные молекулы. Удельное сопротивление резко падает, а с образованием промежуточных кластерных структур из трехатомных молекул (см. рисунок 3, а) вновь должно возрастать, что четко видно на экспериментальных данных, показанных на рисунке 10 (расплав кадмия и цинка) [8].

При незначительном отличии температуры плавления от температуры кипения возникает линейное уменьшение удельного сопротивления с ростом температуры (магний).

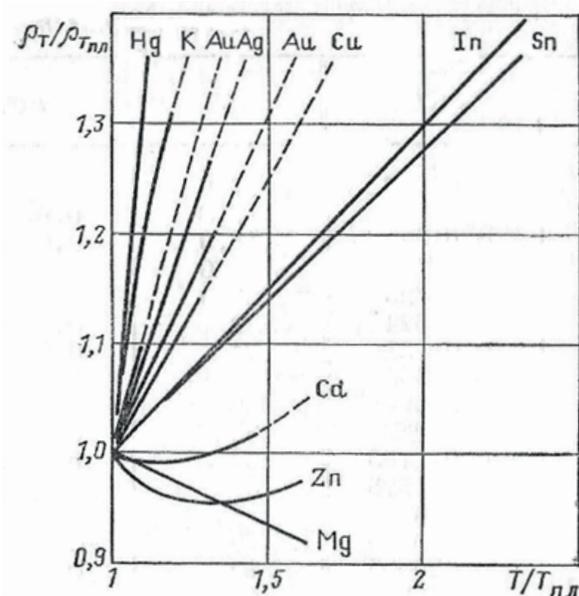


Рисунок 10 — Зависимость удельного сопротивления ряда веществ выше температуры плавления [8]

Для других веществ, у которых температура кипения заметно отличается от температуры плавления, образование трехатомных молекул заторможено, и поэтому возникает линейное возрастание удельного сопротивления с ростом температуры. При отсутствии образования трехатомных молекул удельное сопротивление должно возрастать значительно, что и показано на рисунке 9 пунктирной линией.

Заключение

Проведенный анализ распространения электромагнитных волн в разных средах на основании представлений Максвелла и Теслы позволяет совершенно иначе трактовать протекание электрического тока в разных средах. При этом было выяснено:

1. Представление об электрическом токе как о движении свободных электрических зарядов (электронов и дырок) противоречит данным, полученным экспериментально.

2. Электрический ток в полупроводниках при *n*-проводимости является током проводимости, а при *p*-проводимости является током смещения. Поэтому в полупроводниках движение положительно заряженных «дырок» не существует.

3. С температурой электрический ток проводимости изменяется по экспоненциальному закону, а электрический ток смещения — по линейному закону.

4. При температуре плавления удельное сопротивление возрастает скачком ровно в два раза вследствие образования двухатомных молекул для кристаллических гранцентрированных и объемноцентрированных структур.

5. При температурах выше температуры плавления внутри жидкого состояния вследствие разрушения связи атомов с первым координационным слоем появляются свободные атомы. Свободные атомы взаимодействуют с двухатомными молекулами и образуют трехатомные молекулы, у которых внутренний встроенный электрический дипольный момент значительно возрастает. Это приводит к существенному уменьшению удельного сопротивления, а вблизи температуры кипения с образованием промежуточных кластерных структур удельное сопротивление вновь возрастает.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Фейнман, Р. Фейнмановские лекции по физике: в 5 т. / Р. Фейнман. — М.: МФТИ, 2011. — Т. 5. Электричество и магнетизм. — 420 с.
2. Еланский, Г. Н. Строение и свойства металлических расплавов / Г. Н. Еланский. — М.: Metallurgy, 1991. — 160 с.
3. Суздаев, И. П. Нанокластеры и нанокластерные системы. Организация, взаимодействие, свойства / И. П. Суздаев, П. И. Суздаев // Успехи химии. — 2001. — Т. 70. — № 3. — С. 203–240.
4. Гречихин, Л. И. Кластерный механизм механических и тепловых свойств монокристаллов и конструкционных материалов / Л. И. Гречихин // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. трудов X Международной научно-технической конференции. — Донецк, 2003. — Т. 1. — С. 185–202.
5. Гречихин, Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий. Общие основы, механические, тепловые и эмиссионные свойства / Л. И. Гречихин. — Минск: Технопринт, 2004. — 399 с.
6. Гречихин, Л. И. Наночастицы и нанотехнологии / Л. И. Гречихин. — Минск: Право и экономика, 2008. — 406 с.
7. Гречихин, Л. И. Физика. Электричество и магнетизм. Современная электродинамика / Л. И. Гречихин. — Минск: Право и экономика, 2008. — 302 с.
8. Бабичев, А. П. Физические величины. Справочник / А. П. Бабичев [и др.]. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.
9. Коулсон, Ч. Валентность / Ч. Коулсон. — М.: Мир, 1965. — 295 с.
10. Гречихин, Л. И. Встроенный и наведенный дипольный электрический момент в сложных атомных системах и в двухатомных молекулах / Л. И. Гречихин // Авиационный вестник. — 2020. — № 2. — С. 28–34.
11. Slater, J. C. Quantum Theory of Molecules and Solids / J. C. Slater // NewYork-Toronto-London: Mc Grau-Hill, 1963. — Vol. 1. — 485 p.
12. Slater, J. C. Quantum Theory of Molecules and Solids. / J. C. Slater // NewYork-Toronto-London: Mc Grau-Hill, 1965. — Vol. 2. — 563 p.
13. Slater, J. C. Quantum Theory of Molecules and Solids. / J. C. Slater // NewYork-Toronto-London: Mc Grau-Hill, 1967. — Vol. 3. — 487 p.

14. Gretchikhin, L. Interatomic interactions in diatomic molecules with taking into account the repulsion of the ions in a positively charged core / L. Gretchikhin // Military technical Courier Scientifical of the Ministry of Defence of the Republic of Serbia. – 2020. – Vol. 68, № 2. – P. 225–248.
15. Гречихин, Л. И. Наведенный потенциал между взаимодействующими частицами на наноуровне / Л. И. Гречихин, С. Д. Латушкина, В. М. Комаровская // Военно-технический вестник. – 2015. – Т. 63, № 3. – С. 29–41.
16. Гречихин, Л. И. Образование плотноупакованной и кластерной решеточной структуры индия на поверхности кремния / Л. И. Гречихин [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – № 6. – С. 3–12.
17. Гречихин, Л. И. Исследование поверхностного слоя кремния с напылением индия / Л. И. Гречихин, Ю. Шмермбекк. – Berlin : Lambert Academic Publishing, 2015. – 80 с.
18. Макогонюк, Г. Д. Nanoструктура поверхности кристаллов, полученных из растворов, подвергшихся различным физическим воздействиям / Г. Д. Макогонюк, В. М. Айдаров, А. Д. Седов // Ульяновский Центр трансфера технологий : Сборник аннотаций проектов Молодежного инновационного форума Приволжского федерального округа. – Ульяновск : УлГТУ, 2009. – С. 183.
19. Гречихин Л. И. Агрегатные состояния, их формирование и взаимосвязь / Л. И. Гречихин //Авиационный вестник. – 2020. – № 3. – С. 13–18.
20. Гречихин, Л. И. Плотноупакованное состояние – основа нанотехнологий / Л. И. Гречихин // Труды XIX Международной научно-технической конференции. – Донецк : ДонНТУ, 2012. – Т. 1. – С. 195.
21. Гречихин, Л. И. Основы радиосвязи / Л. И. Гречихин. – Минск : Национальная библиотека Беларуси, 2016. – 377 с.
22. Гречихин, Л. И. Формирование р- и n-проводимости отрицательными ионами / Л. И. Гречихин // Авиационный вестник. – 2022. – № 6. – С. 8–16.

REFERENCES

1. Feinman R. Feinmanovskie lekcyi po fizike. Tom 5. Elektrichestvo i magnetizm [Feynman lectures on physics. Vol. 5. Electricity and magnetism]. Moscow, Moskovskii fiziko-tehnicheskii institut, 2011, 420 p.
2. Elanskii G.N. Stroenie i svoystva metallicheskikh rasplavov [Structure and properties of metal melts]. Moscow, Metallurgiya, 1991, 160 p.
3. Suzdalev I.P., Suzdalev P.I. Nanoklastery i nanoklasternye sistemy. Organizaciia, vzaimodeistvie, svoystva [Nanoclusters and nanocluster systems. Organization, interaction, properties]. Uspekhi Khimii, 2001, vol. 70, no. 3, pp. 203-240.
4. Gretchikhin L.I. Klasternyi mekhanizm mekhanicheskikh i teplovykh svoystv monokristallov i konstrukcionnykh materialov [Cluster mechanism of mechanical and thermal properties of single crystals and structural materials]. Mashinostroenie i tekhnosfera XXI veka. Donetsk, 2003, vol. 1, pp. 185-202.
5. Gretchikhin L.I. Fizika nanochastitsy i nanotekhnologii. Obshchie osnovy, mekhanicheskie, teplovye i emissionnye svoystva [Physics of nanoparticles and nanotechnologies. General fundamentals, mechanical, thermal and emission properties]. Minsk, Technoprint, 2004, 399 p.
6. Gretchikhin L.I. Nanochastitsy i nanotekhnologii [Nanoparticles and nanotechnologies]. Minsk, Pravo i ekonomika, 2008, 406 p.
7. Gretchikhin L.I. Fizika. Elektrichestvo i magnetizm. Sovremennaya elektrodinamika [Physics. Electricity and magnetism. Modern electrodynamics]. Minsk, Pravo i ekonomika, 2008, 302 p.
8. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskiy A.M. Fizicheskie velichiny. Spravochnik [Physical quantities. Guide]. Moscow, Energoatomizdat, 1991, 1232 p.
9. Coulson Ch. Valentinus' [Valence]. Moscow, Mir, 1965, 295 p.
10. Gretchikhin L. Vstroennyi i navedennyi dipol'nyi elektricheskii moment v slozhnykh atomnykh sistemakh i v dvukhatomnykh molekulakh [Built-in and induced electric dipole moments in complex atomic systems and in the diatomic molecules]. The Aviation Herald, 2020, no 2, pp. 28-34.
11. Slater J.C. Quantum Theory of Molecules and Solids. NewYork-Toronto-London, Mc Grau-Hill, 1963, vol. 1, 485 p.
12. Slater J.C. Quantum Theory of Molecules and Solids. NewYork-Toronto-London, Mc Grau-Hill, 1965, vol. 2, 563 p.
13. Slater J.C. Quantum Theory of Molecules and Solids. NewYork-Toronto-London, Mc Grau-Hill, 1967, vol. 3, 487 p.
14. Gretchikhin L. Interatomic interactions in diatomic molecules with taking into account the repulsion of the ions in a positively charged core. Military technical Courier Scientifical of the Ministry of Defence of the Republic of Serbia, 2020, vol. 68, no 2, pp. 225-248.
15. Gretchikhin L.I., Latushkina S.D., Komarovskaya V.M. Navedennyi potentsial mezhdu vzaimodeistvuiushchimi chastitsami na nanourvne [Induced potential between interacting particles at the nanoscale]. Vojnotehnički glasnik/Military Technical Courier, no. 63(3), pp. 29-41.
16. Gretchikhin L.I., Latushkina S.D., Komarovskaya V.M. Obrazovanie plotnoupakovannoi i klasternoi reshetochnoi struktury indii na poverkhnosti kremniia [Formation of a densely packed and clustered indium lattice structure on the silicon surface]. Uprochniaushchie tekhnologii i pokrytiia, 2015, no. 6, pp. 3-12.
17. Gretchikhin L.I., Shmermbekk Yu. Issledovanie poverkhnostnogo sloia kremniia s napyleniem indii [Investigation of the surface layer of silicon with indium deposition]. Berlin, Lambert Academic Publishing, 2015, 80 p.
18. Makogonyuk G.D., Aidarov V.M., Sedov A.D. Nanostruktura poverkhnosti kristallov, poluchennykh iz rastvorov, podvergnutym razlichnym fizicheskim vozdetsviyam. Ul'ianovskii Tsentr transfera tekhnologii [The nanostructure of the surface of crystals obtained from solutions subjected to various physical influences]. Ul'ianovskii Tsentr transfera tekhnologii: Sbornik annotatsii proektov Molodezhnogo innovatsionnogo foruma Privolzhskogo federal'nogo okruga. Ul'ianovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2009, p. 183.
19. Gretchikhin L.I. [Aggregate states of their formation and interrelation]. The Aviation Herald, 2020, no 3, pp. 13-18.
20. Gretchikhin L.I. Plotnoupakovannoe sostoianie – osnova nanotekhnologii [The densely packed state is the basis of nanotechnology]. Trudy XIX mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii. Donetskii natsional'nyi tekhnicheskii universitet, 2012, vol. 1, p. 195.
21. Gretchikhin L.I. Osnovy radiosvazi [Fundamentals of radio communication]. Minsk, Natsional'naia biblioteka Belarusi, 2016, 377 p.
22. Gretchikhin L. I. Formirovanie p- i n-provodimosti otritsatel'nymi ionami [Formation of p- and n-conductivity by negative ions]. The Aviation Herald, 2022, no. 6, pp. 8-16.

*Статья поступила в редакцию
04.09.2023*

ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РЫНКОВ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ

FEATURES AND PROSPECTS OF MARKET DEVELOPMENT UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS

Скрыпник Олег Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры организации движения и обеспечения безопасности на воздушном транспорте учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
skripnikon@yandex.ru

Oleg Skrypnik – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Traffic Management and Safety in Air Transport of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
skripnikon@yandex.ru

Аннотация: в работе представлен анализ состояния и перспектив развития мирового рынка беспилотной авиации, особенности основных национальных рынков. Показаны задачи и особенности системы контроля и управления воздушным движением беспилотных воздушных судов, тенденции развития рынка таких систем. Проанализирована роль международного и региональных регуляторов в работе по координации процессов развития беспилотной авиации и ее интеграции в общее с пилотируемой авиацией воздушное пространство. Проведен общий анализ состояния национального рынка беспилотных авиационных систем.
Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, беспилотная авиационная система, рынок БАС, воздушное пространство, организация воздушного движения беспилотных воздушных судов.

Abstract: the paper presents an analysis of the state and prospects for the development of the global unmanned aircraft market, features of the main national markets. The tasks and features of the air traffic control and control system of unmanned aircraft are shown, trends in the development of the market of such systems. The role of international and regional regulators in coordinating the development of unmanned aviation and its integration into the common airspace with manned aviation is analyzed. A general analysis of the state of the national market of unmanned aircraft systems has been carried out.

Keywords: unmanned aircraft, unmanned aircraft system, UAS market, airspace, unmanned traffic management.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант T23-029).

Введение

Одна из особенностей мировой гражданской авиации на современном этапе состоит в стремительном развитии рынка беспилотных воздушных судов (БВС) и сфер их применения. Высокие темпы развития беспилотной авиации обусловлены тем, что этот вид транспортно-логистического обслуживания предоставляет государствам и различным категориям пользователей уникальные возможности — от доставки жизненно важных материалов, мониторинга объектов природы и до поддержки борьбы со стихийными бедствиями, инспектирования инфраструктуры, точного земледелия и пр., включая и такие инновационные направления, как городская аэромобильность, страхование, управление недвижимостью.

Материалы различных исследований по вопросу оценки состояния мирового и национальных рынков беспилотных авиационных систем (БАС) показывают,

что основными драйверами в данном сегменте являются доступность решений и услуг БВС по сравнению с использованием пилотируемой авиации. БАС обеспечивают возможности, аналогичные пилотируемой авиации, но имеют преимущество в том, что они меньше, доступнее, проще в эксплуатации. Кроме этого, наблюдается расширение возможностей применения малых БВС в совокупности с достижениями в области IT и телекоммуникационных технологий. По экспертным оценкам диапазон возможных применений БАС составляет от 150 до 700 приложений в более чем 20 отраслях экономики [1].

В целом на рынке БАС можно выделить четыре основных компонента (рисунок 1).

Из представленных на рисунке 1 рынков в наименьшей степени исследован рынок образовательных услуг по подготовке персонала БАС, поскольку на его состояние и развитие оказывает влияние не только развитие остальных трех составляющих, но и национальные требования к квалификации персонала БАС и особенности



Рисунок 1 – Компоненты рынка БАС

национальных систем образования. Поэтому в данной работе состояние этого рынка не рассматривается.

Быстрое развитие рынков применения, парка и технологий, связанных с беспилотной авиацией, создает специфические и серьезные проблемы для обеспечения безопасных операций в воздушном пространстве (ВП). Эти проблемы обусловлены:

- ограниченностью объема ВП;
- использованием ВП пилотируемой (в том числе государственной) и беспилотной авиацией;
- декларированием, в соответствии с положениями Конвенции о международной гражданской авиации, равных прав в использовании ВП различным категориям пользователей;
- взрывным характером роста парка БВС и сфер их применений.

Основными факторами, сдерживающими развитие и ограничивающими применение беспилотных авиационных систем, являются:

- введение ограничений на выполнение полетов БВС, связанных с обеспечением безопасности использования ВП;
- несвоевременное и неэффективное решение проблем совместного использования ВП пилотируемой и беспилотной авиацией;
- отсутствие достаточной нормативной базы и апробированных технологий совместного использования ВП беспилотной и пилотируемой авиацией.

Это вызывает необходимость поиска и внедрения новых эффективных нормативных и технических решений для интеграции беспилотной и пилотируемой авиации в общее ВП при сохранении и даже повышении уровня безопасности полетов. При этом важно обеспечить контролируемость, регулируемость и эволюционный характер процессов, связанных с развитием БАС, их применением и интеграцией БВС в общее с пилотируемой авиацией ВП.

Проблема обостряется тем, что в практике мировой гражданской авиации в настоящее время все еще отсутствует апробированная в достаточной степени нормативная база, универсальные подходы к интеграции БВС в общее с пилотируемой авиацией ВП и технологии контроля за полетами БВС.

Основные показатели и прогнозы развития рынков беспилотных авиационных систем

Вопросы оценки состояния мирового и национальных рынков БАС, управления трафиком, прогнозирования развития парка и сфер применения БВС опубликованы в материалах различных исследований корпоративных, национальных и международных

организаций и аналитических бюро. Методики исследований отличаются объемом привлекаемых к ним источников информации, степенью охвата рынков, глубиной проработки различных аспектов, поэтому наблюдаются некоторые отличия в прогностических оценках. При этом многие из прогнозов, выполненных до 2020 г., не учитывали деструктивных процессов, связанных с пандемией, которые не обошли и отрасль беспилотной авиации. Кроме этого, определенное влияние на точность прогнозов оказывает сложившаяся международная военно-политическая и экономическая обстановка.

Практически все из актуальных исследований не находятся в свободном доступе (например, Unmanned Traffic Management (UTM) Global Market Report 2023–2033, ReportLinker, 2022; Unmanned Traffic Management Market Report, 2023; Drone Market Report 2023–2030; Drone Market Size, Forecast 2023–2030; Market Developments & Regulations, Drone Industry Insights, Report, July, 2023). Однако и имеющиеся в распоряжении материалы позволяют получить достаточно целостное представление по рассматриваемому вопросу.

Наряду с растущей популярностью БАС потребительского сектора, БАС гражданского назначения широко применяются в различных отраслях экономики. В целом прогноз развития мирового рынка БАС в миллиардах долларов США характеризуется данными по совокупному среднегодовому темпу роста (CAGR – Compound annual growth rate), приведенными на рисунке 2 [1].

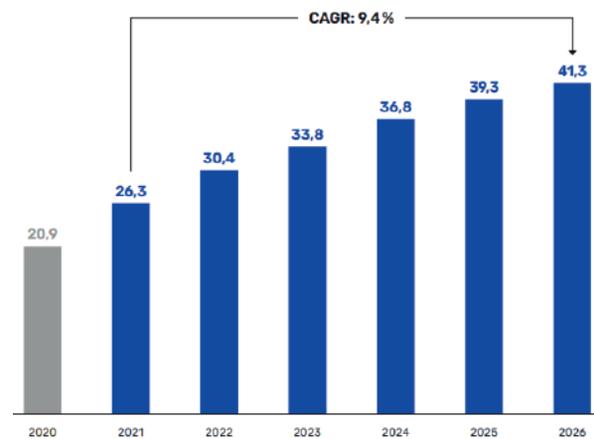


Рисунок 2 – Объем общего мирового рынка БАС

Динамика развития глобального рынка собственно БВС (оборудование БВС, программное обеспечение, сервисы, связанные с передачей данных в интересах обеспечения их трафика) показана на рисунке 3 [2].



Рисунок 3 – Динамика развития рынка БВС

Анализ рисунка 3 показывает, что по данным компонентам до 2050 г. ожидается среднегодовой рост 12 %, причем если в 2020 г. доля программного обеспечения и сервисов, связанных с передачей данных, составляла 40 % рынка, то в 2030 г. она должна составить уже 65 %.

Согласно [3] объем мирового рынка БВС (гражданского и военного назначения) в 2022 г. составил 19 843 млн долларов США. В 2023 г. прогнозируется его объем в размере 22 413 млн долларов и 76 083 млн долларов США в 2033 г. При этом среднегодовой темп роста составит 13 %, что выше, чем за период 2018 – 2022 гг. (9,3 %). Такие темпы роста обусловлены принятием новых решений в области безопасности и мониторинга, расширением сфер применения гражданских и коммерческих БВС, увеличением стратегических инвестиций в оборонный и военный секторы.

Следует отметить, что ежегодный рост рынков беспилотной авиации наблюдается во всех регионах мира (рисунок 4). Согласно аналитическим данным, к 2030 г. объем рынка составит 58,5 млрд долларов США при CAGR равной 7,8 % (уточненный прогноз – 7,4 % [6, 7]).

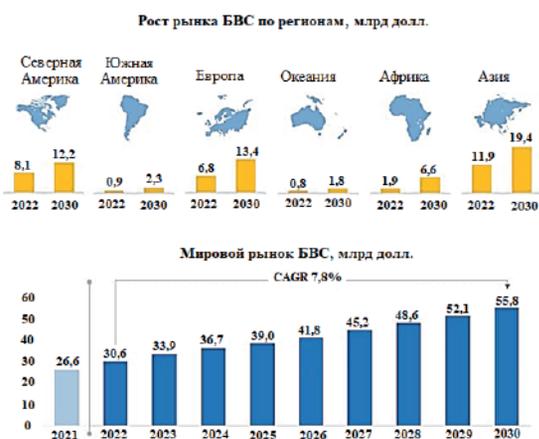


Рисунок 4 – Прогноз рынка БВС по регионам мира [6]

По объему продаж БВС в число ведущих регионов на мировом рынке с точки зрения секторов конечного использования входят Северная Америка и Азиатско-Тихоокеанский регион. В странах североамериканского региона это обусловлено прежде всего за счет поддержки нормативно-правовой базы по использованию БВС. Индия и Китай станут наиболее перспективными в плане роста доходов от беспилотной авиации из-за усиления пограничных конфликтов, роста оборонных инвестиций и внедрения автоматизации транспортно-логистических процессов в этом регионе.

Сегментация рынка БВС по данным анализа на 2021 г. (рисунок 5) [1] показывает, что основную долю рынка (79 %) занимает предоставление услуг с помощью беспилотной авиации.



Рисунок 5 – Сегментация рынка БВС

На рисунке 6 представлены данные по основным отраслям использования БАС и оказываемым ими услугам [1].

Энергетический сектор является крупнейшей отраслью на коммерческом рынке БВС. Самыми перспективными и быстрорастущими сегментами коммерческого применения БАС являются сельское хозяйство, строительство, геодезия и картография, мониторинг объектов инфраструктуры. С течением времени доля замещаемых существующих и новых способов производства услуг беспилотной авиации будет увеличиваться, особенно когда будут сняты инфраструктурные и правовые барьеры эксплуатации малых БАС.

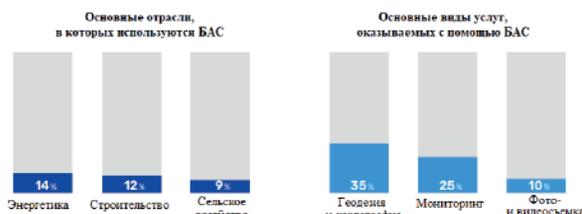


Рисунок 6 – Сегментация рынка БАС по отраслям и оказываемым видам услуг

Однако самой быстрорастущей сферой является транспорт и складирование с помощью БВС (перевозки пассажиров, доставка грузов, выстраивание логистических систем), а также техническое обслуживание инфраструктуры. Так, например, возникло новое направление пассажирских перевозок БАС – городская аэромобильность (Urban Air Mobility), растущий, но пока незначительный по объему сегмент рынка услуг БАС.

К 2025 году, согласно отчету Drone Industry Insights за период 2020 – 2025 гг., транспортный сектор БАС займет уверенное второе место по величине на рынке.

Стремительное развитие рынков БАС, развертывание малых беспилотных авиационных систем (sUAS) для гражданских целей вызвало необходимость создания системы управления воздушным движением БВС – Unmanned Traffic Management (UTM).

Функциональное предназначение, оказываемые услуги, информационная архитектура, протоколы обмена данными, функциональные возможности программного обеспечения, инфраструктура и требования к производительности для управления низковысотными неконтролируемыми операциями БВС определены как часть разработки UTM. При этом экосистема управления движением БВС (UTM) для неконтролируемых операций должна быть отделена от системы управления воздушным движением пилотируемых ВС (ATM), но дополнять ее, обеспечивая безопасное применение БВС в контролируемом и неконтролируемом, общем с пилотируемой авиацией, воздушном пространстве. Определено, что развитие сервисов UTM и ее интеграция в общее ВП будут осуществляться поэтапно до 2030-х гг.

С точки зрения национальной зрелости UTM мировым пионером стала Швейцария. В конце 2020 г. UTM-компания ANRA Technologies запустила службу удаленной идентификации под названием SmartSkies DroneID в партнерстве с Федеральным управлением гражданской авиации Швейцарии (FOCA). Экспертами отмечается, что самой зрелой операционной экосистемой UTM в мире в конце 2022 г. стал порт Антверпена, а Швейцария и Дубай были самыми передовыми

национальными государствами в разработке такой системы [4].

Организация движения БАС (UTM) отличается от системы организации воздушного движения (АТМ) и основана на наличии данных о полете каждого БВС, передаваемых в цифровом виде. В отличие от АТМ, при использовании UTM каждый пользователь будет иметь одинаковую ситуационную осведомленность о ВП. Кроме того, системы UTM передают данные в режиме реального времени операторам или внешним пилотам дронов, чтобы обеспечить безопасное и эффективное выполнение деятельности. Такие данные передаются через распределенную сеть высокоавтоматизированных устройств с использованием интерфейсов прикладного программирования, за исключением голосовой связи.

Обеспечение требуемого уровня безопасности полетов БВС в UTM достигается за счет автоматизации и цифровизации информационных и технологических процессов при организации и управлении воздушным движением, предоставления новых сервисов и услуг для эксплуатантов БВС.

В этом контексте в практике разработчиков принципов и технологий интеграции БВС в общее ВП уже используется новое понятие — цифровое воздушное пространство, в основе которого лежит полномасштабное использование концепции SWIM (System Wide Information Management) — общесистемное управление информацией. SWIM является глобальной инициативой ИКАО в области организации и управления воздушным движением (АТМ), направленной на гармонизацию обмена аэронавигационной, метеорологической и полетной информацией для всех пользователей воздушного пространства и заинтересованных сторон.

Согласно данным [5], мировой рынок UTM в 2022 г. достиг более 1 млрд долл. США и прогнозируется его развитие с CAGR 18,4 % (таблица).

По другим оценкам [6] среднегодовой рост рынка на рассматриваемом временном интервале составит 21,1 %.

Объемы рынков и темпы роста отличаются как по континентам, так и по отдельным государствам. Так, например, рынок UTM стран Латинской Америки оценивается объемом 39,6 млн долл. США в 2023 г., и прогнозируется его рост до 169,6 млн долл. США в 2033 г. с CAGR 15,7 %, причем в течение этого периода ожидается рост CAGR с 15,0 % (период 2023 — 2028 гг.) до 16,4 % (2028 — 2033 гг.).

Китай, по прогнозам, достигнет размера рынка в 187,1 млн долл. США к 2030 г., с CAGR в 24,3 % в течение периода с 2022 г. по 2030 г. Среди других заслуживающих внимания рынков — Япония и Канада, каждый из которых, по прогнозам, вырастет на 18,7 % и 18,4 % соответственно

Таблица — Прогнозы развития мирового и национальных рынков управления беспилотным движением [5]

Наименование показателя	Значение показателя
Объем мирового рынка управления БВС, 2021 г.	905,8 млн долл. США
Объем мирового рынка, 2022 г.	1057,9 млн долл. США
Объем мирового рынка, прогноз 2032 г.	5017,4 млн долл. США
Темпы роста мирового рынка, 2022 — 2032 гг.	18,4 % CAGR
Доля рынка Сев. Америка, 2022 г.	29,4 %
Объем рынка Сев. Америка, 2022 г.	310,6 млн долл. США
Доля рынка Европы, 2022 г.	20,1 %
Объем рынка Европы	212,9 млн долл. США
Доля рынка Китая	9,8 %
Объем рынка Китая	103,9 млн долл. США
Доля рынка топ-3 стран	38,7 %

в период 2022 — 2030 гг. В Европе Германия, по прогнозам, будет расти примерно на 16,5 % CAGR.

В изменившемся бизнес-ландшафте после COVID-19 мировой рынок UTM, по прогнозам, достигнет пересмотренного размера в 3,3 млрд долл. США к 2030 г., увеличившись в среднем на 19,4 % в течение периода 2022 — 2030 гг.

Рост и расширение мирового рынка обеспечивается за счет увеличения государственных и частных инвестиций в развитие автономных систем управления беспилотным движением. Например, Terra Drone Corporation (Япония) привлекла 70 млн долл. США в 2022 г., чтобы ускорить разработку UTM для БВС. Кроме того, расширение рынка управления беспилотным движением, вероятно, будет подпитываться развитием беспилотных транспортных систем и партнерских отношений между частными и государственными участниками рынка для повышения производительности и эффективности UTM.

Использование услуг и сервисов, предоставляемых пользователям UTM при технической поддержке соответствующих программных и аппаратных средств, а также государственное и частное финансирование проектов, связанных с ее развитием, являются основными источниками доходов рынка UTM. На рисунке 7 показан ожидаемый рост рынка UTM по данным компонентам [4].

Размер рынка управления беспилотных систем по компонентам, 2018-2028 гг.

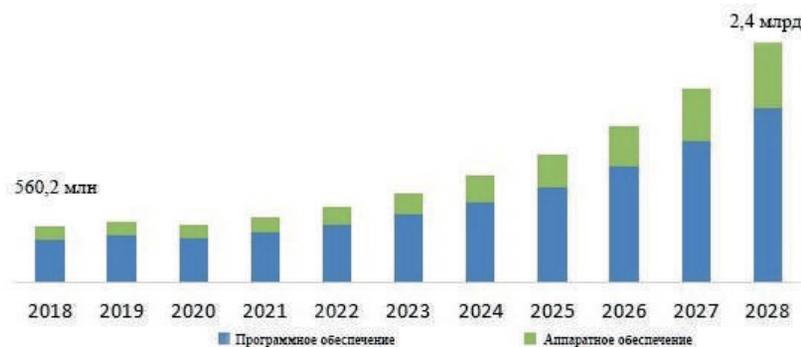


Рисунок 7 — Прогноз объема рынка UTM по программным и аппаратным средствам

Прогноз объемов рынков UTM по оказываемым БАС услугам и сферам применения показан на рисунке 8 [4].

Размер рынка управления беспилотных систем по компонентам, 2018-2028 гг.

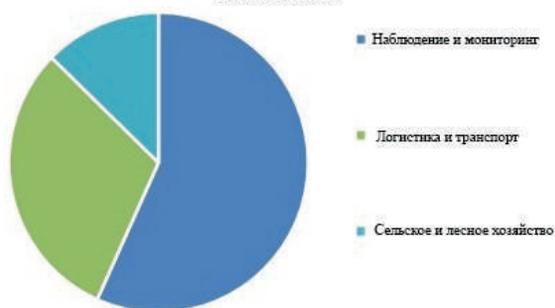


Рисунок 8 — Прогноз объема рынка UTM по сферам применения БАС

Ключевыми компаниями на мировом рынке UTM являются AirMap, Airware, Altitude Angel, Analytical Graphics, ANRA TECHNOLOGIES, Cirium, Delair, DJI, Frequentis, Harris Corporation, L3Harris Technologies, Leonardo S.p.A, Lockheed Martin и OneSky, 3D Robotics и др. [4].

Роль международных и национальных регуляторов в развитии рынка беспилотных авиационных систем

В роли основного регулятора на международном уровне выступает ИКАО, которая организует и ведет работу по координации процессов развития беспилотной авиации и ее интеграции в общее с пилотируемой авиацией ВП, обеспечивает информационную поддержку этих процессов.

С этой целью для гармонизации нормативной базы, применимой к БАС, получения заинтересованными сторонами инструктивных материалов о БАС, ИКАО разработала онлайн-инструментарий (The ICAO UAS Toolkit – Информационный комплект по БАС), который размещен на сайте ИКАО [9].

Для профессионального ознакомления с процессами разработки, эксплуатации и интеграции БАС на сайте ИКАО размещен информационный ресурс Remotely Piloted Aircraft Systems Panel (RPASP) – группы по системам дистанционного пилотирования ВС, которая координирует и разрабатывает стандарты и рекомендуемую практику (SARPs), процедуры и инструктивный материал для систем дистанционного пилотирования ВС, чтобы способствовать безопасной и эффективной интеграции БАС в несегрегированное ВП и ВП аэродромов.

RPASP в сотрудничестве с различными группами экспертов и комиссиями ИКАО проводит конкретные исследования и впоследствии разрабатывает положения, способствующие интеграции БВС в несегрегированное ВП и ВП аэродромов при сохранении существующего уровня безопасности полетов.

ИКАО четко определяет ряд принципиальных положений, а именно:

- в основе всех процессов интеграции БАС в контролируемое и неконтролируемое ВП должна лежать оценка рисков, связанных с влиянием БАС на безопасность

полетов и окружающую среду. Риск-ориентированный подход предполагает пропорциональную зависимость уровня доступа конкретного БВС в ВП от уровня создаваемого им риска при выполнении конкретного полета;

- БАС должны функционировать на общих принципах с пилотируемой авиацией, что подразумевает их соответствие в нормативном и эксплуатационном плане системе организации воздушного движения (ОрВД), регулирующей организацию и использование воздушного пространства пилотируемой авиацией;

- БАС должны развиваться в соответствии с концепцией PBN (Performance Based Navigation) ИКАО, что определяет требования к бортовым датчикам БВС, каналам связи и содержанию передаваемой по ним информации;

- важная роль отводится системе наблюдения за БВС и ситуационной осведомленности всех участников воздушного движения о состоянии ВП, процессах, его характеризующих, и динамике изменения этих процессов;

- развитие и интеграция БАС в систему ОрВД должны проходить поэтапно.

Несмотря на объективно существующие отличия в структуре ВП государств и подходов к его использованию беспилотной авиацией, различную степень развития рынков БАС усилиями ИКАО удалось достичь целого ряда согласованных позиций по вопросам организации использования ВП, классификации БВС, организации их воздушного движения и интеграции в общее ВП.

При анализе развития рынков БАС на национальном и региональном уровне можно отметить следующие государства, добившиеся наиболее значимых успехов в этом вопросе:

- США, поскольку по целому ряду аспектов нормативно-правового регулирования, развития БАС, сфер применения и организации воздушного движения БВС, США занимают ведущие позиции в мире. В США проделана значительная работа по внедрению БВС в общее ВП, в том числе в городскую среду;

- Китай, поскольку КНР занимает одну из ведущих позиций в мире по производству БВС как гражданского, так и военного назначения, а вопросы применения БАС и использования ими ВП отличаются некоторыми специфическими решениями. На конец 2021 г. в КНР около 12 600 организаций использовали в своей деятельности БАС. На Китай приходится 70 % производимых на мировом рынке гражданских БАС;

- Евросоюз (в целом), поскольку ведущую роль в координации процессов развития беспилотной авиации и ее интеграции в общее воздушное пространство Евросоюза играет Европейское агентство по безопасности полетов (EASA), которому также делегированы права по разработке нормативной базы на все типы и классы БВС. Еврокомиссии предоставлено право принимать делегированные действия, касающиеся спецификаций для проектирования, производства, обслуживания и эксплуатации БАС;

- Российская Федерация, поскольку в России в последние годы проводится широкий круг исследований и реализуются проекты по направлениям, связанным с развитием беспилотной авиации. В Российской Федерации на государственном уровне принят ряд системно-образующих документов, обеспечивающих ускоренное

развитие беспилотной авиации, таких как «Стратегия развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года» (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 21 июня 2023 г. № 1630-р), «Концепция интеграции беспилотных воздушных судов в единое воздушное пространство Российской Федерации» и «План реализации Концепции интеграции беспилотных воздушных судов в единое воздушное пространство Российской Федерации в части развития технологий» (утверждены Распоряжением Правительства Российской Федерации от 5 октября 2021 г. № 2806-р), «Перечень поручений по вопросам развития беспилотных авиационных систем», утвержденный Президентом Российской Федерации 30 декабря 2022 года.

На основе выполненного анализа можно заключить, что к настоящему времени в мировой практике проведен достаточно большой объем работ и сформировано общее видение проблем развития рынка применений БАС, организации воздушного движения БВС и их интеграции в общее с пилотируемой авиацией ВП. Это позволяет государствам с учетом национальных интересов и особенностей использования ВП организовать работы по развитию беспилотной авиации, расширению сфер ее применения при одновременном создании обеспечивающей минимальные риски системы управления движением БВС в общем ВП.

Состояние рынка беспилотных авиационных систем в Республике Беларусь

Анализ состояния вопроса и проблем, связанных с развитием рынка БАС и организацией воздушного движения БВС показывает, что Беларусь занимает достаточно заметное место на рынке производителей БВС, прежде всего военного назначения. Сектор продукции гражданского назначения развит в меньшей степени. Так, республиканское унитарное предприятие «Научно-производственный центр многофункциональных беспилотных комплексов» Национальной академии наук Беларуси производит беспилотные авиационные комплексы и БВС для выполнения наблюдения, разведки и сбора данных (с получением видеoinформации, в том числе в ИК-диапазоне, в высоком разрешении), проведения аэрофотосъемки, ретрансляции сигналов радиосвязи, использования в научных исследованиях, транспортировки грузов.

Китайско-Белорусское совместное предприятие ЗАО «Авиационные технологии и комплексы» выпускает БАК и БВС, предназначенные для мониторинга различных объектов, фото-, видеосъемки, выполнения сельскохозяйственных работ. ООО «КБ беспилотные вертолеты» осуществляет широкий спектр разработок БВС вертолетного типа массой от 150 кг. ООО «Центр промышленных беспилотных решений «Коптер Бай», позиционирует себя как системный интегратор беспилотных решений в области геодезии и картографии, промышленности и безопасности, коммунального, лесного и сельского хозяйства.

Вместе с этим следует констатировать, что рынок применения БВС и БАС гражданского назначения в Беларуси в должной степени не исследован. При этом рынок оказания услуг БАС существует и представлен, кроме непосредственно производителей БВС, таки-

ми игроками, как например, Белорусская федерация беспилотной авиации, ООО «Центр беспилотной авиации», ООО «Белстройпромналадка», ОАО «558 Авиаремонтный завод» и другими.

Перечень предлагаемых ими услуг включает мониторинг городской инфраструктуры, объектов транспортной сети, лесного и сельского хозяйства, энергетики, выполнение аэрофото- и видеосъемок, картографирование, телевизионная и тепловизионная съемка, сельскохозяйственные работы, участие в поисково-спасательных операциях, обслуживание культурно-массовых мероприятий, в очень незначительной степени – доставка грузов.

Проекты и работы по созданию системы управления воздушным движением БВС в рамках государства или профильных организаций активно не проводятся. В 2022 году сделаны первые шаги по упорядочиванию использования БВС в ВП Республики Беларусь и были приняты Руководство по порядку государственного учета и эксплуатации гражданских беспилотных летательных аппаратов (утверждено приказом Департамента по авиации Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь от 04.10.2022 № 268) и Руководство по оценке операционных рисков при эксплуатации гражданских беспилотных летательных аппаратов (утверждено приказом Департамента по авиации Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь от 11.11.2022 № 309).

В Беларуси отсутствует концепция внедрения БАС в общее ВП государства, организации его использования, что может стать основным фактором, сдерживающим развитие многих инновационных направлений в различных отраслях экономики (транспорт, логистика, сельское хозяйство и др.). Допуск БАС к использованию ВП требует закрепления норм, правил, ответственности различных субъектов, задействованных в эксплуатации БАС, создания информационных сервисов для их безопасного и эффективного использования.

С целью всестороннего рассмотрения вопросов развития беспилотной авиации необходимо разработать концепцию интеграции БВС в воздушное пространство Республики Беларусь, дополненную планом ее поэтапной реализации (дорожной картой). В качестве первоочередных мероприятий можно отметить изучение потенциального рынка услуг БАС, организацию удаленного учета и регистрации БВС и БАС, разработку первичного пакета нормативных документов, регулирующих процесс эксплуатации БАС и использования ВП, оценку средств наземной инфраструктуры и сервисов, обеспечивающих внедрение системы организации и управления полетами БВС (белорусский аналог UTM, который можно назвать как BYUTM), разработку архитектуры, определение сервисов и информационных процессов BYUTM, выделение пилотных зон для отработки и верификации предлагаемых решений, создание системы профессиональной подготовки специалистов БАС и общей грамотности населения в вопросах применения БВС.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что беспилотная авиация является интенсивно развивающимся сектором мировой экономики и может стать одним из

эффективных драйверов роста экономики, как отдельных государств, так и мировой экономики в целом. Краткосрочные и долгосрочные прогнозы показывают устойчивый и значительный рост рынка БАС и его компонентов. Игнорирование государственными органами и регуляторами в области гражданской авиации про-

блем, связанных с развитием беспилотной авиации, ее интеграции в общее ВП, попытки ограничить доступ БАС в ВП, объективно приведет к серьезным экономическим и репутационным потерям, торможению инновационного развития экономики и общества.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Центр стратегических разработок [Электронный ресурс]: Состояние и тенденции развития рынка беспилотных авиационных систем в мире и России. – Режим доступа: <https://www.csr.ru>. – Дата доступа: 29.08.2023.
2. Indra Air Drones. UTM Solutions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://icao.int/NACC/Documents/Meetings/2021/UASRPAS/P27-UASRPASW2-UTM-INDRA.pdf>. – Дата доступа: 29.08.2023.
3. Unmanned Aerial Vehicles Market Snapshot (2023 to 2033) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://futuremarketinsights.com/reports/unmanned-aerial-vehicle-market>. – Дата доступа: 29.08.2023.
4. The market for UAV traffic management services 2023–2027 by Philip Butterworth-hayes. Edition 6.1. February 2023 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://unmannedairspace.info>. – Дата доступа: 29.08.2023.
5. Unmanned Traffic Management market outlook (2022–2032, Fact.MR, 2022) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://factmr.com/report>. – Дата доступа: 29.08.2023.
6. Unmanned Traffic Management (UTM) Global Market Report 2023–2033 [Электронный ресурс]: ReportLinker, 2022. – Режим доступа: <http://reportlinker.com/p06368570/>. – Дата доступа: 29.08.2023.
7. Drone Market Report 2023–2030. Drone Market Size, Forecast 2023–2030 [Электронный ресурс]: Market Developments & Regulations, Drone Industry Insights, Report, July, 2023. – Режим доступа: <https://droneii.com/product/drone-market-report#download>. – Дата доступа: 29.08.2023.
8. ICAO UNITING AVIATION [Электронный ресурс]: Unmanned Aviation and Advanced Air Mobility. – Режим доступа: <http://icao.int/safety/UA/Pages/default.aspx>. – Дата доступа: 29.08.2023.

REFERENCES

1. Center for Strategic Research: The state and development trends of the unmanned aircraft systems market in the world and Russia, available at: <https://www.csr.ru> (accessed 29 August 2023).
2. Indra Air Drones. UTM Solutions, available at: <http://icao.int/NACC/Documents/Meetings/2021/UASRPAS/P27-UASRPASW2-UTM-INDRA.pdf> (accessed 29 August 2023).
3. Unmanned Aerial Vehicles Market Snapshot (2023 to 2033), available at: <http://futuremarketinsights.com/reports/unmanned-aerial-vehicle-market> (accessed 29 August 2023).
4. The market for UAV traffic management services 2023–2027 by Philip Butterworth-hayes. Edition 6.1. February 2023, available at: <https://www.unmannedairspace.info> (accessed 29 August 2023).
5. Unmanned Traffic Management market outlook (2022–2032, Fact.MR, 2022), available at: <http://factmr.com/report/> (accessed 29 August 2023).
6. Unmanned Traffic Management (UTM) Global Market Report 2023–2033, ReportLinker, 2022, available at: <http://reportlinker.com/p06368570/> (accessed 29 August 2023).
7. Drone Market Report 2023–2030. Drone Market Size, Forecast 2023–2030. Market Developments & Regulations, Drone Industry Insights, Report, July, 2023, available at: <https://droneii.com/product/drone-market-report#download> (accessed 29 August 2023).
8. ICAO UNITING AVIATION: Unmanned Aviation and Advanced Air Mobility, available at: <http://icao.int/safety/UA/Pages/default.aspx> (accessed 29 August 2023).

*Статья поступила в редакцию
30.08.2023*

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА ГЕОГРАФИЧЕСКИХ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА В РАЗНОСТНО- ДАЛЬНОМЕРНОЙ СИСТЕМЕ «ЧАЙКА»

RESEARCH OF ALGORITHMS CALCULATION OF THE GEOGRAPHICAL COORDINATES OF THE OBJECT IN THE DIFFERENCE-RANGEFINDER SYSTEM "CHAIKA"

Боровой Александр Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории военного факультета учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
baravoi_aliaksandr@mail.ru

Alexander Borovoy – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, leading researcher at the research laboratory of the Military Faculty of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
baravoi_aliaksandr@mail.ru

Тищенко Тарас Анатольевич – заместитель начальника учебно-методической части учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
taras1984.08.02@mail.ru

Taras Tishchenko – Deputy Head of the educational and methodological part of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
taras1984.08.02@mail.ru

Маликов Алексей Сергеевич – старший преподаватель кафедры воздушных судов и авиационного оборудования учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
werdish5@gmail.com

Alexey Malikov – Senior Lecturer at the Department of Aircraft and Aviation Equipment of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
werdish5@gmail.com

Аннотация: проведен критический анализ существующих алгоритмов расчета географических координат объекта в разностно-дальномерной системе. Осуществлено численное моделирование алгоритмов функционирования для формирования предложений по повышению точности определения географических координат объекта. Проведено сравнение размеров рабочих зон радиотехнической системы дальней навигации при использовании различных существующих алгоритмов для количественного сравнения результатов моделирования. Предложен усовершенствованный комбинированный способ расчета географических координат объекта в разностно-дальномерной системе, характеризующийся решением проблем неоднозначности получения оценок географических координат и выбора начальной точки итерационного алгоритма, что подтверждается результатами имитационного математического моделирования.

Ключевые слова: разностно-дальномерная навигационная система, алгоритм, географические координаты, моделирование.

Abstract: a critical analysis of the existing algorithms for calculating the geographical coordinates of an object in a difference-rangefinder system is carried out. Numerical modeling of the algorithms is carried out to form proposals for improving the accuracy of determining the geographical coordinates of the object. The size of working zones of the radio-technical system of long-range navigation when using different existing algorithms for quantitative comparison of modeling results is compared. An improved combined method of calculating the geographic coordinates of an object in a difference-range system is proposed, characterized by solving the problems of ambiguity of obtaining estimates of geographic coordinates and choosing the starting point of the iterative algorithm, which is confirmed by the results of simulation mathematical modeling.

Keywords: difference-range navigation system, algorithm, geographic coordinates, modeling.

Введение

Навигационные системы подавляющего большинства современных воздушных судов (ВС) представляют собой устройства, построенные на основе измерителей различной физической при-

роды. При этом ядром навигационных систем является обычно приемник сигналов спутниковой навигационной системы (СНС). Зависимость от СНС несет в себе значительные недостатки и требует поиска и использования резервных систем. Одним из возможных вариантов резервных систем

может быть разностно-дальномерная система (РСДН) «Чайка» [1]. Проблема зависимости навигационных систем ВС от СНС является достаточно актуальной как для Республики Беларусь [2], так и зарубежных стран [3].

Достоинствами РСДН «Чайка» являются: большая дальность действия (до нескольких тысяч километров от наземных станций), неограниченная пропускная способность, отсутствие на борту ВС передающего устройства, отсутствие ограничений по высотности для ВС, использующих околоземное пространство. Вместе с тем одним из основных недостатков РСДН «Чайка» является относительно невысокая точность определения координат объекта (максимальная ошибка определения местоположения – 100...1000 м) [4, с. 25]. Для увеличения точности определения географических координат объекта с использованием разностно-дальномерной информации можно повышать точность определения первичных измеряемых параметров, например, за счет улучшения алгоритмов обработки радиосигналов [5], либо точность синхронизации наземных станций системы «Чайка» [6]. Вместе с тем существует нереализованный потенциал за счет обработки избыточности первичных измеряемых параметров в РСДН «Чайка», которая возникает вследствие возможности приема радиосигналов как минимум с четырех наземных пунктов [1]. Это обусловлено достаточно высоким энергетическим потенциалом наземных станций системы «Чайка».

Постановка задачи

Рассмотрим РСДН «Чайка», образованную ведущей (А) и четырьмя ведомыми (Б, В, Г, Д) наземными станциями с априорно известными геодезическими координатами. На подвижном объекте устанавливается приемник радиосигналов наземных станций, который измеряет временные интервалы, пропорциональные разностям дальностей ($D_{BC} - D_{AC}; D_{BC} - D_{AC}; D_{TC} - D_{AC}; D_{AC} - D_{AC}$). Необходимо провести критический анализ существующих способов расчета геодезических координат подвижного объекта φ_C, λ_C и осуществить поиск путей решения основных проблем. Геометрическая интерпретация определения геодезических координат подвижного объекта представлена на рисунке 1.

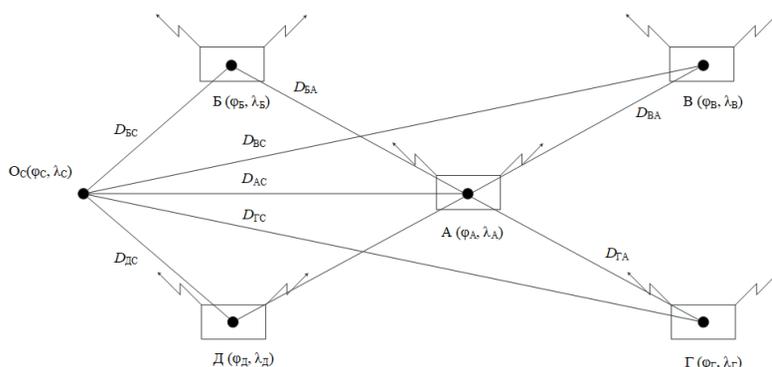


Рисунок 1 – Геометрическая интерпретация задачи определения геодезических координат в разностно-дальномерной системе

Решение задачи

Основные подходы к решению данной задачи достаточно подробно описаны в [7]. При этом рассматриваются три варианта формулировки задачи: распространение радиосигнала по прямой (условия прямой видимости); распространение радиосигнала вдоль геодезической линии (подвижный объект расположен на поверхности земли); комбинированное распространение радиосигнала (подвижный объект расположен над поверхностью земли). Для любого из представленных выше вариантов постановки задачи существуют две фундаментальные проблемы: аналитическое решение получения неоднозначности в оценках определения координат объекта; повышение точности измерения координат за счет обработки избыточности первичных измеряемых параметров (разностей дальностей).

Решение первого варианта постановки задачи является самым простым из рассматриваемых выше. Однако даже оно не является тривиальным и связано с применением значительного рода упрощений и итерационных методов решения задачи [8]. Также существует алгоритм расчета декартовых координат, отличающийся одновременным решением задачи однозначности и обработки избыточности первичных параметров [9, 10].

Дополнительные проблемы при реализации алгоритмов расчета географических координат возникают при условии распространения радиосигналов по геодезической линии. В таких условиях возникают сложности в расчете расстояния между двумя точками, которые не имеют аналитического решения (эллиптические интегралы), а вычисления осуществляются по приближенным, достаточно громоздким, формулам. Все это в совокупности приводит к необходимости реализации алгоритмов расчета географических координат итерационным способом с применением различного рода упрощений [7, с. 119–130], что, в свою очередь, приводит к появлению еще одной проблемы, связанной с выбором начальной точки для осуществления итераций.

Третий вариант решения задачи, хоть и является наиболее точным, однако ввиду сложности практической реализации алгоритмов [7, с. 130–133] на практике не применяется [4]. Для формирования предложений по повышению точности определения географических координат объекта в системе «Чайка» целесообразно провести численное моделирование существующих алгоритмов функционирования.

Методика проведения численного эксперимента

Рассматривается участок эллипсоида вращения (поверхности Земли) в диапазоне изменения широты и долготы от 0 град до 90 град. В точках, с априорно известными координатами, располагаются наземные станции системы «Чайка»: квадрат – ведущая станция; треугольники – ведомые станции. В каждой точке анализируемого участка с шагом 0,3 град ($N_{max} = 90000$ точек) определенного участка эллипсоида осуществляется расчет значения

среднеквадратического отклонения (СКО) оценки определения широты (σ_φ) и долготы (σ_λ) объекта. Ошибки определения разностей дальностей считаются некоррелированными Гауссовскими случайными величинами с равными значениями СКО (1 мкс). Количество вычислительных экспериментов, проводимых в каждой анализируемой точке, – 1000. Под рабочей зоной понимается участок пространства, в котором точность определения географических координат не менее заданной.

Результаты и их обсуждение

Используя представленный в [9, с. 135–140] алгоритм, который отличается одновременным использованием информации от всех входящих в систему «Чайка» наземных станций (четырёх разностей дальностей), были получены рабочие зоны системы «Чайка» (рисунок 2).

Показанные на рисунке 2 результаты позволяют говорить об относительно невысокой точности определения географических координат. Это связано с тем, что в применяемом алгоритме отсутствует учет распространения радиосигналов по геодезической линии.

Для сравнения с представленным выше алгоритмом [9, с. 135–140] может быть использован другой, применяемый в навигационном приемнике А-713 системы «Чайка» [4, с. 137–147]. Отличительной особенностью такого алгоритма является учет различий в скорости распространения радиосигналов, что имеет значение при функционировании радиосистем на тысячи километров. Для работоспособности алгоритма необходимо наличие не менее двух разностей дальностей (трех наземных станций). Вместе с тем проблемным вопросом является выбор (предварительный расчет) географических координат начальной точки итерационного алгоритма, которые в реализованной математической модели принимают значения истинного местоположения объекта. Результаты моделирования процесса функционирования алгоритма, представленного в [4, с. 137–147], приведены на рисунке 3 для пары соседних (рисунок 3, а и б) и противоположных (рисунок 3, в и г) ведомых станций.

Для количественного сравнения изображенных на рисунках 2 и 3 результатов моделирования проведем сравнение размеров рабочих зон РСДН (таблица 1).

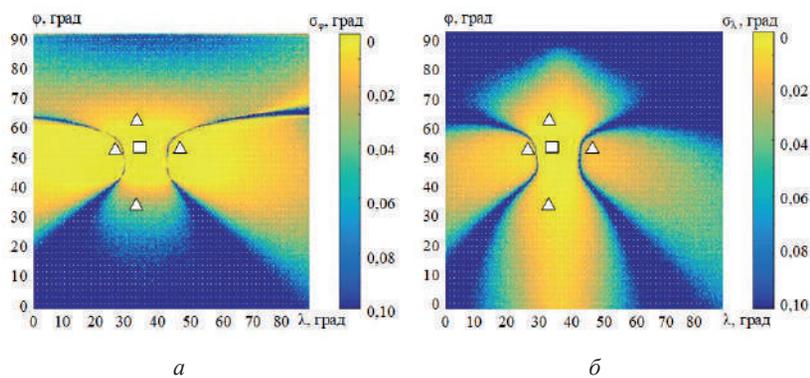


Рисунок 2 – Рабочие зоны системы «Чайка», полученные при использовании алгоритма, представленного в [9, с. 135–140]:

а – зависимость σ_φ от географических координат объекта;
б – зависимость σ_λ от географических координат объекта

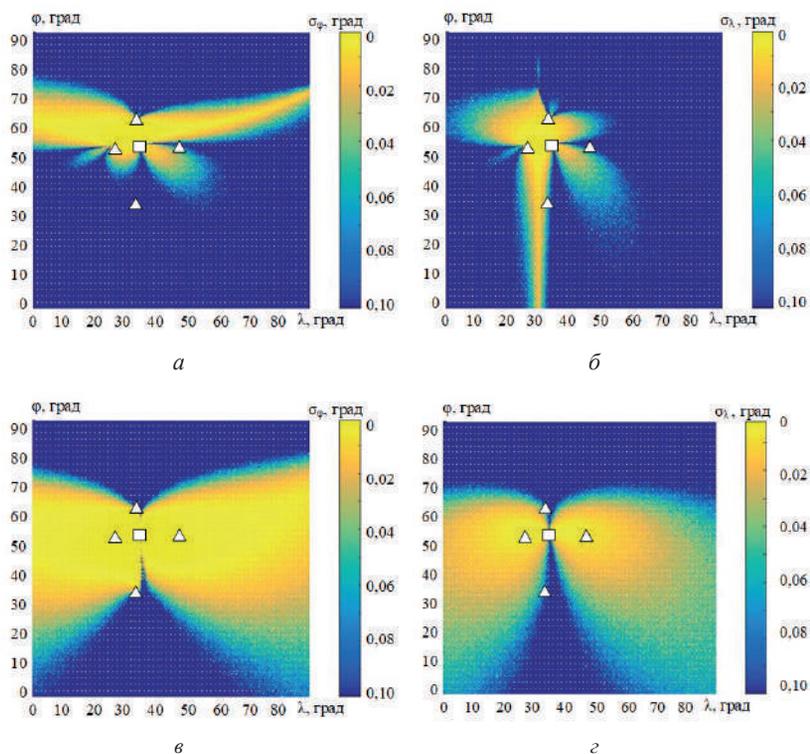


Рисунок 3 – Рабочие зоны системы «Чайка» полученные при использовании алгоритма функционирования системы А-713:

а – зависимость σ_φ от географических координат для пары соседних ведомых станций;
б – зависимость σ_λ от географических координат для пары соседних ведомых станций;
в – зависимость σ_φ от географических координат для пары противоположных ведомых станций;
г – зависимость σ_λ от географических координат для пары противоположных ведомых станций

Количественные (таблица 1) и качественные (рисунки 2 и 3) результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы:

1. Рабочая зона системы «Чайка» при использовании алгоритма расчета географических координат, указанного в [9, с. 135–140] (рисунок 2), имеет большие

Таблица 1 – Количество точек участка эллипсоида со значением СКО ошибки определения географических координат, не превышающего заданного значения

	Рисунок 2		Рисунок 3			
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>
$\sigma_\varphi < 0,10$ град	67507	–	20510	–	56790	–
$\sigma_\varphi < 0,05$ град	50394	–	14323	–	46120	–
$\sigma_\varphi < 0,01$ град	17598	–	5633	–	25221	–
$\sigma_\lambda < 0,10$ град	–	60843	–	19676	–	58570
$\sigma_\lambda < 0,05$ град	–	45457	–	10098	–	40629
$\sigma_\lambda < 0,01$ град	–	7294	–	2064	–	3318

размеры (67507, 60843 против 56790, 58570 точек соответственно) и менее изрезанную форму по сравнению с результатами, изображенными на рисунке 3 *a, б*.

2. При использовании алгоритма, приведенного в [4, с. 137 – 147], точность определения географических координат в пределах рабочей зоны выше по сравнению с [9, с. 135 – 140]: 25221, 3318 против 17598, 7294 точек соответственно, даже без учета избыточности первичных параметров ([9, с. 135 – 140] используется информация от пяти наземных станций РСДН, а [4, с. 137 – 147] – от трех наземных станций).

Результаты сравнения позволяют прийти к логичной целесообразности совместного использования двух анализируемых алгоритмов, которые синергетически дополняют друг друга и могут решить основную проблему [4, с. 137 – 147] – выбора начального значения географических координат точки для реализации итерационного алгоритма. Поскольку чем ближе она к истинному значению, тем более вероятным является сходимость итерационного алгоритма к данному значению (в разностно-дальномерных системах существует проблем неоднозначности получаемых оценок).

Логичное продолжение совершенствования алгоритма [4, с. 137 – 147] – повышение точности определения географических координат. Для этого пять наземных позиций системы «Чайка» (см. рисунок 1) необходимо разбить на шесть безызыбыточных подсистем по три станции (А В В, А В Г, А Г Д, А Д Б, А Б Г,

А В Д). Эллипсы ошибок измерения в каждой из подсистем изображены на рисунке 4.

Представленные на данном рисунке результаты подтверждают незначительную корреляцию (коэффициент корреляции менее 0,01) между получаемыми оценками от шести подсистем. Вместе с тем существует сложность в аналитическом расчете значений ошибок определения координат каждой из подсистем для организации алгоритмов фильтрации, представленных, например, в [11, 12].

Заключение

Анализ существующих алгоритмов определения географических координат в РСДН позволил сформулировать их основные проблемы. Для их устранения был получен комбинированный алгоритм, который позволяет разрешить неоднозначность получения оценок и осуществить выбор начальной точки итерационного алгоритма. Проведенный анализ показал отсутствие аналитического решения задачи определения статистических характеристик оценок географических координат объекта, что является направлением дальнейших исследований. Их актуальность связана с тем, что без учета избыточности первичных измеряемых параметров не могут быть выполнены требования к повышению точности определения географических координат.

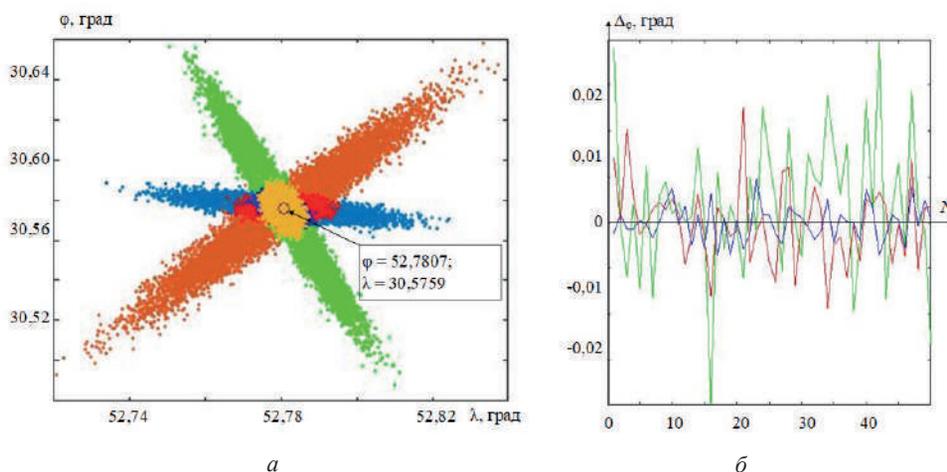


Рисунок 4 – Измеренные значения географических координат объекта шестью подсистемами, входящими в систему «Чайка»:

- a* – эллипсы ошибок измерения в каждой из подсистем;
- б* – ошибки измерений широты объекта для трех подсистем

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Боровой, А. Г. Математическая модель разностно-дальномерной системы дальней навигации / А. Г. Боровой, А. П. Кульпанович, А. С. Маликов // *Авиационный вестник*. – 2022. – № 7. – С. 47–51.
2. Воробей, О. В. Оценка возможности приема сигналов аппаратурой импульсно-фазовой радионавигационной системы в интересах сухопутной группировки войск / О. В. Воробей, В. Ю. Пальчик // *Наука и военная безопасность*. – 2022. – № 4. – С. 23–28.
3. Park, J. Effect of Outlier Removal from Temporal ASF Corrections on Multichain Loran Positioning Accuracy / J. Park // *In Proceedings of the 2020 20th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, Busan, Korea, 13–16 October 2020. – Korea, 2020. – P. 824–826.
4. Бортовая аппаратура А-711, А-720 и А-713 М радиотехнических систем дальней навигации / Н. А. Сазонов [и др.]. – Тамбов : ТВВАИУ им. Ф. Э. Дзержинского, 1988. – 243 с.
5. Ma, W. Suppression of Continuous Wave Interference in Loran-C Signal Based on Sparse Optimization Using Tunable Q-Factor Wavelet Transform and Discrete Cosine Transform / W. Ma, J. Gao, Y. Yuan, Z. Shi // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – P. 7153.
6. ГОСТ Р 53168-2008. Система радионавигационная «Чайка». Сигналы передающих станций. Технические требования / Национальный стандарт Российской Федерации; Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – М.: 2009. – 20 с.
7. Бабич, О. А. Обработка информации в навигационных комплексах / О. А. Бабич. – М.: Машиностроение, 1991. – 512 с.
8. Вычисление пространственных координат целей в разностно-дальномерных комплексах пассивной локации методом Левенберга – Марквардта / А. А. Дмитренко [и др.] // *Доклады БГУИР*. – 2020. – Т. 18, № 5. – С. 35–43.
9. Калитин, С. Б. Конструктивные методы определения координат объектов в многопозиционных измерительных системах: моногр. / С. Б. Калитин, К. К. Пашенко. – Минск : ВА РБ, 2018. – 198 с.
10. Zhang, L. An efficient constrained weighted least squares method with bias reduction for TDOA-based localization / L. Zhang, T. Zhang, H-S. Shin // *IEEE Sensors Journal*. – 2021. – Vol. 21, Issue 8. – P. 10122–10131.
11. Хмарский, П. А. Влияние выбора моделей входного воздействия на точность измерений вектора состояния для фильтров Калмана / П. А. Хмарский, А. С. Солонар // *Доклады БГУИР*. – 2012. – № 7 (69). – С. 47–53.
12. Степанов, А. О. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации / А. О. Степанов. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ «Электронприбор», 2010. – Часть 1. Введение в теорию оценивания. – 509 с.

REFERENCES

1. Borovoy A.G., Kulpanovich A.P., Malikov A.S. Matematicheskaya model raznostno-dalnomernoj sistemy dalnej navigacii [Mathematical model of the difference-rangefinder system for long-range navigation]. *Aviation Herald*, 2022, no. 7, pp. 47-51.
2. Vorobej O.V., Palchik V.Yu. Ocenka vozmozhnosti priema signalov apparaturoj impulsno-fazovoj radionavigacionnoj sistemy v interesah suhoputnoj gruppirovki vojsk [Assessment of the possibility of receiving signals by equipment of a pulse-phase radio navigation system in the interests of a ground group of troops]. *Nauka i voennaya bezopasnost*, 2022, no. 4, pp. 23-28.
3. Park J. Effect of Outlier Removal from Temporal ASF Corrections on Multichain Loran Positioning Accuracy. In *Proceedings of the 2020 20th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, Busan, Korea, 13-16 October 2020, pp. 824-826.
4. Sazonov N. A., Abrarov A. T., Aleksandrovich A. R., Kunickij G. A., Matveev V. N., Bortovaya apparatura A-711, A-720 i A-713 M radiotekhnicheskikh sistem dalnej navigacii [Onboard equipment A-711, A-720 and A-713 M long-range navigation radio systems]. Tambov, TVVAIU im. F. E. Derzhinskogo, 1988, 243 p.
5. Ma, W., Gao, J., Yuan, Y., Shi, Z. Suppression of Continuous Wave Interference in Loran-C Signal Based on Sparse Optimization Using Tunable Q-Factor Wavelet Transform and Discrete Cosine Transform. *Sensors*, 2021, vol. 21, p. 7153, <https://doi.org/10.3390/s21217153>.
6. ГОСТ Р 53168-2008 Sistema radionavigacionnaya «Chajka». Signaly peredayushih stancij. Tehnicheskie trebovaniya [Radio navigation system "Chaika". Signals from transmitting stations. Technical requirements]. Nacionalnyj standart Rossijskoj Federacii / Federalnoe agentstvo po tehničeskomu regulirovaniyu i metrologii. Moscow, 2009, 20 p.
7. Babich O.A. Obrabotka informacii v navigacionnyh kompleksah [Information processing in navigation systems]. Moscow, Mashinostroenie, 1991, 512 p.
8. Dmitrenko A. A., Sedyshev S. Yu., Kuleshov Yu. E., Bogatyrev A. A. Vychislenie prostranstvennyh koordinat celej v raznostno-dalnomernyh kompleksah passivnoj lokacii metodom Levenberga – Markvardta [Calculation of spatial coordinates of targets in difference rangefinder complexes of passive location using the Levenberg – Marquardt method]. *Doklady Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radioelektroniki*, 2020, no. 5, pp. 35-43.
9. Kalitin S.B., Pashenko K.K., Konstruktivnyye metody opredeleniya koordinat obektov v mnogopozicionnyh izmeritelnyh sistemah [Constructive methods for determining the coordinates of objects in multi-position measuring systems], monogr. Minsk, Voennaja akademija Respubliki Belarus', 2018, 198 p.
10. Zhang L, Zhang T, Shin H-S. (2021) An efficient constrained weighted least squares method with bias reduction for TDOA-based localization. *IEEE Sensors Journal*, Volume 21, Issue 8, April 2021, pp. 10122-10131.
11. Hmarskij P.A., Solonar A. S. Vliyanie vybora modelej vhodnogo vozdejstviya na tochnost izmerenij vektora sostoyaniya dlya filtrov Kalmana [Influence of the choice of input influence models on the accuracy of measurements of the state vector for Kalman filters] *Doklady Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radioelektroniki*, 2012, no 7 (69), pp. 47-53.
12. Stepanov A. O. Osnovy teorii ocenivaniya s prilozheniyami k zadacham obrabotki navigacionnoj informacii. Chast 1. Vvedenie v teoriyu ocenivaniya [Fundamentals of estimation theory with applications to problems of processing navigation information. Part 1. Introduction to assessment theory]. Izd. 2-e ispravlen. i dopolnen. Saint Petersburg, Elektronpribor, 2010, 509 p.

*Статья поступила в редакцию
09.10.2023*

КОМПАРАТИВНАЯ ОЦЕНКА РЕГУЛЯТОРОВ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НА ОСНОВЕ ПИД-ЗАКОНОВ И НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

COMPARATIVE EVALUATION OF REGULATORS ELECTRIC MACHINE PARAMETERS BASED ON PID-LAWS AND FUZZY LOGIC

Александр Григорьевич Капустин – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры естественнонаучных и профессиональных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
kapustin2649@mail.ru

Alexander Kapustin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Natural Science and Professional Disciplines of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
kapustin2649@mail.ru

Ксения Валерьевна Терещенко – магистр, младший научный сотрудник Центра геофизического мониторинга Национальной академии наук, Республика Беларусь
kokovita13@gmail.com

Ksenia Tereshchenko – Master's degree student, Junior Research Associate of the Geophysical Monitoring Center of the National Academy of Sciences, Republic of Belarus
kokovita13@gmail.com

Аннотация: выполнен параметрический анализ ПИД-регулятора и нечеткого регулятора (fuzzy logic) электрических машин (синхронного генератора, двигателя постоянного тока) при различных возмущениях. Показано, что система управления машинами на основе нечеткой логики обеспечивает существенное повышение качества выходных параметров.

Ключевые слова: параметрический анализ, ПИД-регулятор, нечеткая логика, нечеткий регулятор, MATLAB, моделирование, синхронный генератор, двигатель постоянного тока.

Abstract: parametric analysis of PID-regulator and fuzzy controller (fuzzy logic) of electric machines (synchronous generator, DC motor) under different perturbations is carried out. It is shown that fuzzy logic-based machine control systems provide a significant improvement in the quality of output parameters in comparison with the PID controller adjusted by the classical Ziegler-Nichols method. It is shown that changing the number of control rules for the controller based on fuzzy (fuzzy) logic affects the quality of control.

Keywords: parametric analysis, PID controller, fuzzy logic, fuzzy controller, MATLAB, modeling, synchronous generator, DC motor, control quality.

Введение

Качество электроэнергии, как и качество управления, оказывают существенное влияние на надежность, эффективность функционирования и массо-габаритные показатели авиационных электрических машин.

Дальнейшее совершенствование систем управления режимами работы машин связано с применением в них оптимальных (интеллектуальных) законов управления и цифровой техники. Причем при обосновании требований к системам управления необходимо учитывать ряд специфических факторов, обусловленных функционированием электрических машин [1 – 4].

Исследование процессов управления электрическими машинами представляет значительный интерес с точки зрения оценки предельных возможностей повышения качества управления при неизменных характеристиках машин.

Одной из основных проблем, возникающих при создании интеллектуальных цифровых систем управления, является проблема рационального выбора ее структуры, которая во многом зависит от структуры и параметров объекта управления и состава решаемых функциональных задач [2, 4].

Анализ результатов исследований позволяет отметить, что интеллектуальные системы управления будут способны эффективно управлять электрическими машинами при их работе в нормальных режимах, импульсно-периодических режимах, при включении относительно мощного оборудования с асинхронным приводом; автоматически и гибко изменять свою структуру в нормальных и аварийных режимах работы и др.

Постановка проблемы

Объектом исследования являются авиационные коллекторные (имеют щеточно-коллекторный узел) и

бесколлекторные (имеют вентильный коммутатор) генераторы и двигатели постоянного тока.

Цель работы – разработка нечеткого регулятора напряжения генераторов и частоты вращения вала двигателя при учете дефектов в щеточно-коллекторном узле (скол, подгар и поломка щеток), вентильном коммутаторе (обрыв, пробой диодов) и действий внешних возмущений (изменении тока нагрузки, момента и частоты оборотов вала генератора).

В процессе работы проведены экспериментальные исследования влияния дефектов щеточно-коллекторного узла (ЩКУ) и вентильного коммутатора, воздействий внешних возмущений на качество выходного напряжения и управления двигателем.

Наиболее сильное проявление дефектов наблюдается у генераторов и двигателей, имеющих щеточно-коллекторный узел. Так износ щеток, их слабый прижим, заедание в обойме, а также биение коллектора чаще всего приводят к нарушениям процесса коммутации преимущественно одной из щеток с одной или группой пластин коллектора. Число таких нарушений за оборот соответствует количеству зон плохого контакта. Очевидно, что они обуславливают модуляцию выходного напряжения генератора постоянного тока с частотами, кратными частоте вращения якоря. По аналогичным причинам на частоте вращения и кратных ей частотах будут проявляться также дефекты обмотки якоря и вентильного коммутатора (обрывы секций, витковые замыкания, обрывы и пробой диодов).

Сколы щеток обуславливают нарушение коммутации при каждом переключении секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую, что приводит к модуляции выходного напряжения с частотами, кратными частоте коммутации (рисунок 1).

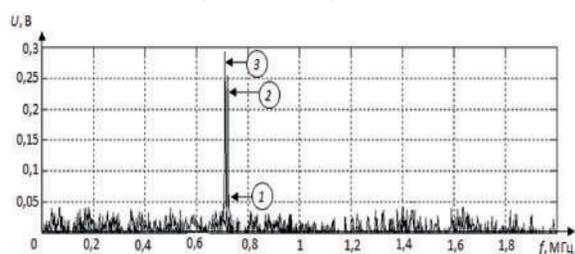


Рисунок 1 – Разностный спектр сигнала пульсаций напряжения внешней цепи:

1 – исправный ЩКУ; 2 – скол одной щетки щеточного узла; 3 – скол трех щеток щеточного узла

Неравномерный износ коллектора приводит к формированию выходного напряжения на промежуточных частотах (диапазон частот между частотой вращения якоря и частотой коммутации). При этом размер частотного диапазона зависит от характера износа коллектора.

Процессы имеют циклический характер. Это говорит о том, что при появлении дефектов необходимо корректировать значение задающего сигнала управления напряжением генератора (ток возбуждения) и частотой вращения вала двигателя для обеспечения качества управления этими электрическими машинами.

Все эти явления вызывают пульсации напряжения во внешней цепи (рисунок 2).

Установленная в ходе моделирования зависимость амплитуды гармоники на частоте коммутации u_k спектра напряжения от интенсивности искрения P имеет вид

$$u_k = 2 \tau n \omega_c J_\delta \left(\sqrt{\frac{2 a r l_m P}{\rho \tau n L \beta_k}} + \left(\frac{\xi N p}{\pi D_a} + \frac{K_a}{\beta_k} \right) i_a \right), \quad (1)$$

где τ – протяженность полюсного деления;

n – частота вращения якоря, об/с;

ω_c – число витков в секции;

l_δ – длина активной части деления обмотки якоря;

a – число параллельных ветвей обмотки якоря;

r – сопротивление секции;

ρ – число пар полюсов;

ξ – удельная магнитная проводимость путей для магнитных потоков взаимной индукции;

N – количество активных проводников, составляющих обмотку якоря;

D_a – диаметр якоря;

K_a – эмпирический коэффициент, учитывающий изменение сопротивления скользящего контакта в процессе коммутации;

i_a – ток якоря.

Реализовать учет этих особенностей в законе управления электрическими машинами возможно с применением ПИД-регуляторов или интеллектуальных регуляторов (нечеткая логика, нейронные сети) [1, 3, 4].

Для расчета коэффициентов ПИД-регулятора использовался метод построения переходной характеристики без обратной связи в среде программирования MATLAB (№ SKR/1843-234).

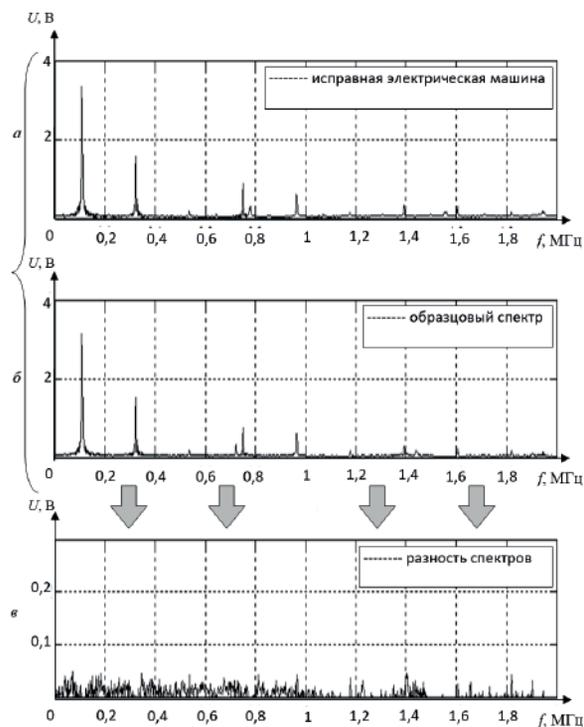


Рисунок 2 – Разностный спектр сигнала пульсаций напряжения внешней цепи авиационного генератора ГСР-СТ-12/40Д; а – измеренный спектр исправного генератора; б – образцовый спектр исправного генератора; в – разностный спектр

Результаты исследований

В теории автоматического управления разработка алгоритмов функционирования регулятора предполагает использование дифференциальных уравнений

для описания модели объекта. Однако, технологические объекты зачастую обладают транспортными запаздываниями и распределенными параметрами. В результате формальные методы разработки алгоритмов функционирования регуляторов оказываются нерабочими. Для решения данного вопроса рассматривалось применение экспертных оценок структуры алгоритмов – ПИД-алгоритм. Этот алгоритм заложен в основу работы

ПИД-регуляторов. Для его реализации определены коэффициенты и параметры ПИД-алгоритма (законна): K_p, T_i, T_d – пропорциональный коэффициент, постоянная интегрирования и постоянная дифференцирования соответственно. В этом случае параметры регуляторов записываются в виде выражений $T = 0,71; L = 0,06; a = 0,005$, где величины a и L выражаются через параметры переходной характеристики объекта регулирования.

С учетом данных значений выполнены расчеты параметров ПИД-регуляторов по различным методам (таблица 1).

Рассчитанные параметры ПИД-регуляторов с учетом зависимостей таблицы 1 сведены в таблицу 2.

Показатели исследований качества регулирования различных ПИД-регуляторов для двигателей постоянного тока сведены в таблицу 3. Для сравнения приведены результаты моделирования переходных процессов двигателя постоянного тока без регулятора. Из таблицы видно, что лучшей методикой расчета параметров является ручная настройка ПИД-регулятора, однако ручная настройка параметров зачастую сложна и требует много времени, поэтому обычно используются другие методы настройки, которые существенно сокращают время разработки и протесты в использовании.

На рисунках 3–5 показано сравнение ПИД-регуляторов двигателей постоянного тока, параметры которых рассчитаны с использованием различных методов. Нумерация методов осуществляется по горизонтальной оси: 1 – метод Зиглера – Никольса по отклику на скачок; 2 – метод CHR, по отклику на изменение уставки без перерегулирования; 3 – метод CHR, по отклику на изменение уставки с 20 % перерегулированием; 4 – метод CHR, по отклику на внешние возмущения без перерегулирования; 5 – метод CHR, по отклику на внешние возмущения с 20 % перерегулированием; 6 – метод Cohen-Coon; 7 – метод AMIGO; 8 – метод ITAE.

Анализ результатов исследований (рисунки 3–5) позволил выявить следующее:

1. ПИД-регуляторы с коэффициентами, рассчитанными по методу Зиглера – Никольса, обладают малым запасом устойчивости. Данный метод дает самое большое амплитудное значение переходной функции, значительную величину перерегулирования (таблица 4). Достоинством метода является малое время нарастания функции до максимума и быстрое время установления переходных процессов. Переходная функция с параметрами регулятора, рассчитанными по данному методу,

Таблица 1 – Зависимости для расчета коэффициентов и параметров ПИД-регуляторов

Метод	K_p	T_i	T_d
Метод Зиглера – Никольса по отклику на скачок	$1,2/a$	$0,9L/K$	$0,5L/K$
Метод CHR, по отклику на изменение уставки без перерегулирования	$0,6/a$	$1,0L/K$	$0,5L/K$
Метод CHR, по отклику на изменение уставки с 20 % перерегулированием	$0,95/a$	$1,4L/K$	$0,47L/K$
Метод CHR, по отклику на внешние возмущения без перерегулирования	$0,95/a$	$2,4L/K$	$0,42L/K$
Метод CHR, по отклику на внешние возмущения с 20 % перерегулированием	$1,2/a$	$2,0L/K$	$0,42L/K$
Метод Cohen-Coon	$\frac{1,35}{a} \left(1 + \frac{0,18\tau}{1-\tau} \right)$	$\frac{2,5-2\tau}{1-0,39\tau} L$	$\frac{0,37-0,37\tau}{1-0,81\tau} L$
Метод ITAE	$\frac{0,956}{K \left(\frac{T}{L} \right)^{0,855}}$	$\frac{T}{\left(0,796-0,147 \frac{L}{T} \right)}$	$0,308T \left(\frac{L}{T} \right)^{0,929}$
Метод AMIGO	$\frac{1}{K} \left(0,2 + 0,45 \frac{T}{L} \right)$	$\frac{0,4L + 0,8T}{L + 0,1T} L$	$\frac{0,5LT}{0,3L + T}$

Таблица 2 – Параметры ПИД-регуляторов

Метод	K_p	T_i	T_d
Метод Зиглера – Никольса по отклику на скачок	240,00	2,25E-4	1,25E-4
Метод CHR, по отклику на изменение уставки без перерегулирования	120,00	5,0E-4	2,50E-4
Метод CHR, по отклику на изменение уставки с 20 % перерегулированием	190,00	4,42E-4	1,48E-4
Метод CHR, по отклику на внешние возмущения без перерегулирования	190,00	7,58E-4	1,33E-4
Метод CHR, по отклику на внешние возмущения с 20 % перерегулированием	240,00	5,00E-4	1,05E-4
Метод Cohen-Coon	274,10	0,15	0,02
Метод ITAE	0,12	0,91	0,02
Метод AMIGO	5,53	0,27	0,03

Таблица 3 – Результаты моделирования эффективности ПИД-регуляторов для двигателей постоянного тока

Метод	Перерегулирование	Время нарастания, с	Амплитудное значение	Запас устойчивости по фазе	Время установления переходного процесса, с
Переходная характеристика без регулятора	0,0 %	22,8000	1,00	92,3 deg @ 0,1 rad/s	40,400
Метод Зиглера – Никольса по отклику на скачок	36,0 %	0,0598	1,36	31,2 deg @ 20,7 rad/s	1,035
Метод CHR, по отклику на изменение уставки без перерегулирования	18,5 %	0,0962	1,18	44 deg @ 13,9 rad/s	0,997
Метод CHR, по отклику на изменение уставки с 20 % перерегулированием	30,3 %	0,0696	1,30	35,1 deg @ 18,2 rad/s	1,035
Метод CHR, по отклику на внешние возмущения без перерегулирования	30,3 %	0,0696	1,30	35,1 deg @ 18,2 rad/s	1,035
Метод CHR, по отклику на внешние возмущения с 20 % перерегулированием	36,0 %	0,0598	1,36	31,2 deg @ 20,7 rad/s	0,707
Ручная настройка параметров	13,9 %	0,0212	1,14	62,2 deg @ 59,3 rad/s	0,127
Метод Cohen-Coon	39,1 %	0,0550	1,39	29,3 deg @ 2,3 rad/s	1,966
Метод ITAE	22,7 %	0,5250	1,23	45,9 deg @ 2,42 rad/s	2,980
Метод AMIGO	0,0 %	18,9000	1,00	86,9 deg @ 0,11 rad/s	34,100



Рисунок 3 – График времени установления переходных процессов с применением различных методик расчета коэффициентов для построения ПИД-регулятора

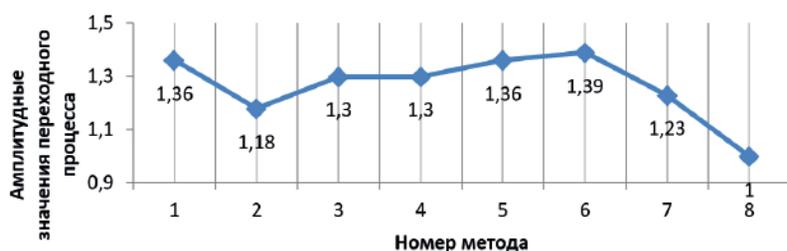


Рисунок 4 – График амплитудных значений переходного процесса с применением различных методик расчета коэффициентов для построения ПИД-регулятора

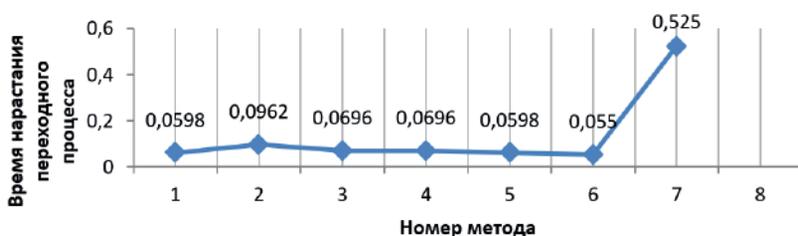


Рисунок 5 – График времени нарастания переходного процесса с применением различных методик расчета коэффициентов для построения ПИД-регулятора

имеет запаздывание по отношению к внешнему возмущению порядка 0,1–0,3 с и величину перерегулирования до 60 %. В целом можно сказать, что метод Зиглера – Никольса дает не самые оптимальные значения параметров регулирования.

2. Коэффициенты, рассчитанные по правилам ручной настройки, определяются опытным путем и показывают, что увеличение пропорционального коэффициента K_p повышает быстродействие, но снижает запас устойчивости; ошибка регулирования уменьшается быстрее с уменьшением интегральной составляющей T_i , уменьшение постоянной интегрирования понижает запас устойчивости системы; увеличение дифференциальной составляющей T_d повышает запас устойчивости и быстродействие. Использование среды программирования MATLAB существенно сокращает время ручной настройки параметров, позволяя получить оптимальный результат при минимальных затратах на разработку.

3. В методе CHR для расчетов коэффициентов использован уже не декремент затухания, как в методе Зиглера – Никольса, а критерий максимальной скорости нарастания при отсутствии перерегулирования

и с 20 % перерегулированием. Это позволило получить намного больший запас устойчивости системы. Расчет параметров так же прост, как и в методе Зиглера – Никольса.

4. Метод CHR использует два подхода к расчету параметров регулятора. Первый получается на основе наблюдения отклика на изменение уставки, второй – на основе наблюдения отклика на внешние возмущения. Соответственно первый используется для повышения качества регулирования при изменении уставки, а второй – для ослабления влияния внешних воздействий на качество регулирования. Чтобы совместить эти два направления расчетов, используют регуляторы с двумя степенями свободы (двухканальные).

5. Метод Cohen-Coop является одной из разновидностей метода Зиглера – Никольса. Данные регуляторы обладают большой чувствительностью, однако имеют более сложный расчет по формулам.

6. Метод AMIGO в целом схож с методом Зиглера – Никольса. Регуляторы обладают достаточно малой величиной перерегулирования и неплохим запасом устойчивости по фазе.

7. Метод ITAE основан на методе AMIGO. Регуляторы обладают большей робастностью и малой величиной перерегулирования, что важно при разработке регулятора для силовых установок, где большое амплитудное значение возмущений может привести к выходу техники из строя [2, 15, 19].

При разработке виртуальной модели регулятора с нечеткой логикой использовался блок *Fuzzy Logic Controler* [4]. В этом блоке задавалась ссылка на *fis*-файл с правилами нечеткой логики для управления напряжением генератора.

Нечеткий регулятор создавался по методу нечеткого вывода *tamdani*. Вывод типа *tamdani* ожидает, что выходные функции членства будут нечеткими. После объединения, для каждой выходной переменной существует нечеткое множество, которое нуждается в дефазификации (преобразовании нечеткого множества в четкое множество) [4].

На основе кривой регулирования напряжения, определяемой ГОСТ Р 54073-2017, задавались рамки изменения (ограничения) каждого входного сигнала регулятора [5]. Для формирования выходного сигнала определялся диапазон требуемого сигнала и основные границы установления сигнала, в зависимости от входных данных.

Регулирующее воздействие u рассчитано с учетом отклонения текущих значений выходных параметров от номинального e и дискретной скорости его изменения Δe . Используя известные плотности распределения вероятностей входных воздействий вычислена плотность распределения каждого терма во всех клетках таблицы 4 ($Z0$ – ошибка отсутствует, N – отрицательная ошибка, P – положительная ошибка, $S/M/B$ – величина ошибки (малая, средняя и большая соответственно)). Значение корреляционного момента отклонений и скорости изменения регулируемой величины для k и $k + 1$ моментов времени определяется выражением

Таблица 4 – Расчет регулирующего воздействия согласно условной вероятности

e	Δe							u
	NB	NM	NS	$Z0$	PS	PM	PB	
NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	$Z0$	u
NM	NB	NM	NM	NS	NS	$Z0$	PS	
NS	NM	NM	NS	NS	$Z0$	PS	PS	
$Z0$	NM	NS	NS	$Z0$	PS	PS	PM	
PS	NS	NS	$Z0$	PS	PS	PM	PM	
PM	NS	$Z0$	PS	PS	PM	PM	PB	
PB	$Z0$	PS	PS	PM	PM	PB	PB	

$$r[e(k), \Delta e(k)] = M\{e(k)[e(k) - e(k-1)]\} = M\{e^2(k)\} - M\{e(k)e(k-1)\} = d - r(\Delta t), \quad (2)$$

где M – математическое ожидание;

d – дисперсия;

$r(\Delta t)$ – корреляционная функция [1].

Если интервал квантования сравнительно мал, вычисленное по этой формуле значение корреляционной функции практически равно нулю. Таким образом, плотность распределения термов в клетках таблицы алгоритма функционирования регулятора равна произведению соответствующих плотностей распределения отклонения и скорости изменения отклонения [1, 2, 4].

Так как каждому значению базовой переменной на входе регулятора может соответствовать несколько соседних термов с различными плотностями вероятностей, то для вычисления плотности распределения регулирующего воздействия применяется формула полной вероятности [1 – 3].

Согласно формуле, появление терма регулирующего воздействия определяется следующим выражением:

$$p(\mu)d\mu = 0,375p(PS)d\epsilon d\Delta\epsilon + (0,125 + 0,375 + 0,125)p(PM)d\epsilon d\Delta\epsilon = 0,375p(PS)d\epsilon d\Delta\epsilon + 0,625p(PM)d\epsilon d\Delta\epsilon. \quad (3)$$

В результате создано 49 правил, учитывающих плотность распределения регулирующего воздействия (рисунки 6, 7).

Входными сигналами данной цифровой нечеткой системы регулирования являются не только напряжение генератора (частота вращения вала двигателя), но и сила тока нагрузки (ток возбуждения двигателя) и флуктуации напряжения, вызванные дефектами. Это, в свою очередь, приводит к значительному увеличению быстродействия, поскольку в настоящее время любой ПИД-закон управления напряжением генератора ориентируется только на изменение напряжения рабочей обмотки якоря генератора (для двигателя – частота вращения вала). При изменении нагрузки отклонение напряжения генератора обусловлено реакцией якоря, т. е. изменение напряжения генератора является следствием изменения нагрузки. В связи с этим, при контроле величины тока нагрузки появляется возможность определения значения величины тока обмотки возбуждения, соответствующего данной нагрузке и данному дефекту.

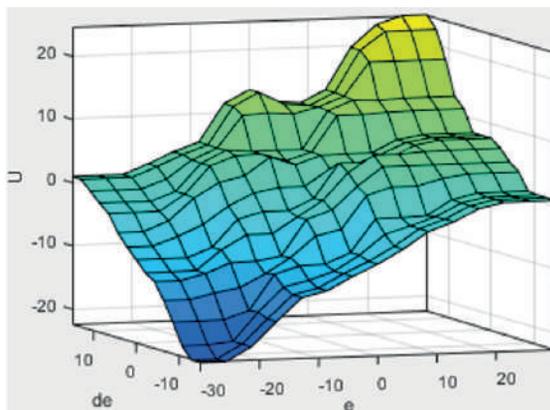


Рисунок 6 – Визуальное отображение плотности распределения регулирующего воздействия

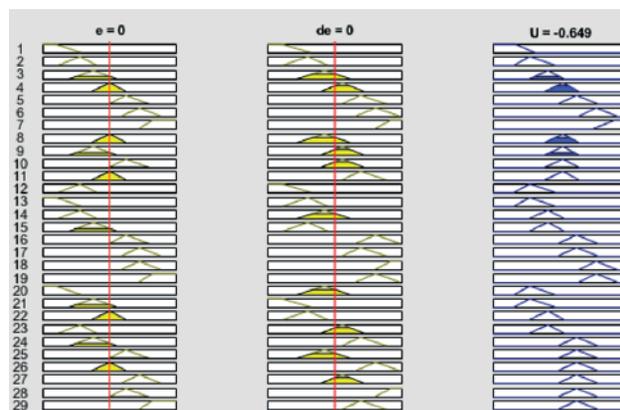


Рисунок 7 – Визуальное отображение правил нечеткого регулятора

Имитационное моделирование позволило получить графики изменения выходных параметров для двух систем регулирования – серийной (ПИД-регулятор) и нечеткой.

Анализ исследований показал (таблица 5)

- семь правил являются минимальным количеством правил, при которых система с нечеткой логикой способна эффективно управлять выходным сигналом;

- количество правил от 1 до 6 недостаточно для осуществления управления, т. е. система при таком количестве правил практически не реагирует на управляющий сигнал;

- при увеличении количества правил с 8 до 10 эффективность управления практически не меняется и остается такой же, как при применении 7 правил;

- при увеличении количества правил до 11 система становится более робастной (величина перерегулирования уменьшается на 5% – 7% по сравнению с процессами регулирования при использовании 7 правил);

- дальнейшее увеличение правил с 12 до 15 и выше показало, что эффективность управления не возрастает;

- нечеткий регулятор при 7 – 15 правилах является более робастным и время регулирования значительно меньше в сравнении с робастностью и быстродействием ПИД-регулятора;

- оптимальными для системы управления данным двигателем являются 7 и 11 правил.

При сравнении работы нечеткого регулятора и ПИД-регулятора (с учетом возмущений) можно отметить, что ПИД-регулятор имеет низ-

Таблица 5 – Основные показатели сравнения эффективности работы ПИД-регулятора и нечеткого регулятора

Показатель	Регулятор с нечеткой логикой без возмущений		ПИД-регулятор
	7 – 10 правил	11 – 15 правил	
t_p – время регулирования, с	0,400	0,475	0,500
σ – величина перерегулирования	0,375	0,250	1,125
Энергетические затраты относительно ПИД-регулятора, о. е.	11175,5 о.е.*		–
Коэффициент колебательности К	40	60	14

*о.е. – относительные единицы

Таблица 6 – Основные показатели сравнения эффективности работы нечеткого регулятора с семью и одиннадцатью правилами

Показатель	№ возмущения	Регулятор с нечеткой логикой без возмущений	
		7 – 10 правил	11 – 15 правил
Периодические возмущения относительно ПИД	1	0,350	0,420
	2	0,375	0,365
	3	0,250	0,310
	4	0,420	0,380
Время запаздывания	1	0,050	0,070
	2	0,050	0,030
	3	0,050	0,050
	4	0,050	0,030
Максимальная разница (рис. 8)	2	0,375	0,420
Время запаздывания (рис. 8)	2	0,050	0,070
Минимальная разница (рис. 8)	3	0,250	0,310
Время запаздывания (рис. 8)	3	0,050	0,050
Энергетические затраты, о. е	1	4044,3	3513,5
	2	5820,1	5272,9
	3	3188,5	2082,8
	4	3519,6	1621,6

кую робастность в сравнении нечетким регулятором: при 11 правилах система более робастна в сравнении с работой при 7 правилах, однако время установления сигнала незначительно увеличивается. Так как для системы регулирования в данном случае главным критерием является робастность, то целесообразно использовать 11 правил.

Расчет энергетических затрат на управление показал неэффективность ПИД-регулятора по данному критерию и подтвердил эффективность нечеткого регулятора с 11 правилами по энергозатратам на ликвидацию величины перерегулирования.

Показано, что регулятор на основе нечеткой логики имеет лучшее качество управления в сравнении с ПИД-регулятором, настроенным по классическому методу Зиглера – Никольса. Кроме того, показано, что изменение количества правил управления для регулятора на основе нечеткой логики влияет на качество управления (таблица 6).

На графике (рисунок 8) отражена работа нечеткого регулятора при 7 и 11 правилах с периодическими возмущениями. Сравнение этих графиков наглядно показывает, что при 11 правилах система более робастна в сравнении с работой при 7 правилах, однако время установления сигнала незначительно увеличивается (таблица 6). Поскольку для системы регулирования двигателя постоянного тока главным критерием является робастность, то целесообразно использовать 11 правил.

Расчет энергетических затрат на управление показал неэффективность ПИД-регулятора по данному критерию и подтвердил эффективность нечеткого регулятора с 11 правилами по энергозатратам на перерегулирование.

Анализ данных исследования (таблица 6) показал:

- разность амплитудных значений между ПИД-регулятором и нечетким регулятором значительная, что говорит о высокой робастности нечеткого регулятора по сравнению с ПИД-регулятором;
- амплитудная разность между нечетким регулятором с 7 и 11 правилами незначительная и ей можно пренебречь;
- согласно времени запаздывания, ПИД-регулятор отличается

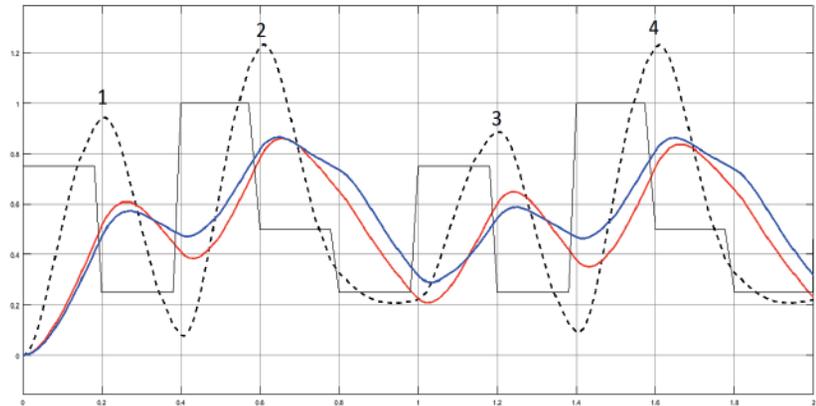


Рисунок 8 — Реакция регуляторов на возмущения:
 - - - - - периодические возмущения для ПИД-регулятора;
 — нечеткого регуляторами с 7 правилами;
 — нечеткого регулятора с 11 правилами

Таблица 7 — Разница амплитудных значений и время запаздывания при периодических возмущениях

Разница амплитудных значений	Номер возмущения			
	1	2	3	4
ПИД-регулятор и нечеткий регулятор с 7 правилами (PID 7)	0,350	0,375	0,250	0,420
ПИД-регулятор и нечеткий регулятор с 11 правилами (PID 11)	0,420	0,365	0,310	0,380
Нечеткий регулятор с 7 правилами и 11 правилами (7 11)	0,070	0,010	0,060	0,040
Время запаздывания	1	2	3	4
Время t (PID 7)	0,05	0,05	0,05	0,05
Время t (PID 11)	0,07	0,03	0,05	0,03
Время t (7 11)	0,02	0,02	0,001	0,02

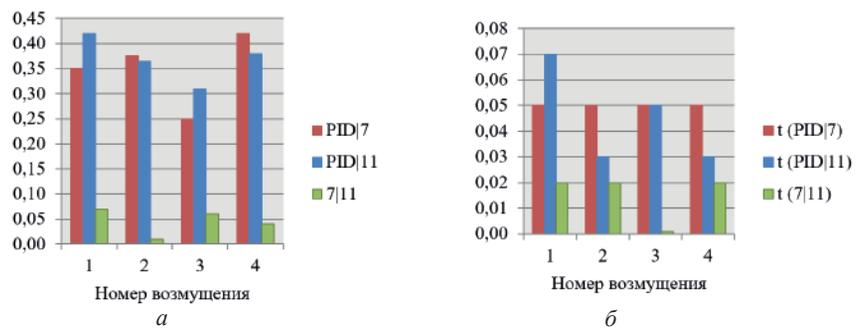


Рисунок 9 — Разница амплитудных значений (а); время запаздывания (б)

высоким быстродействием относительно нечеткого.

На рисунке 9 представлена разность амплитудных значений выходных параметров и время запаздывания ПИД-регулятора и регулятора с нечеткой логикой

(PID|7 и PID|11 — сравнение ПИД-регулятора и регулятора с нечеткой логикой с 7 и 11 правилами соответственно; 7|11 — разность амплитуд выходных параметров регулятора с нечеткой логикой с 7 и 11 правилами).

Заклучение

Сравнительный анализ методов расчета коэффициентов регуляторов показал, что каждый из них эффективен в определенных областях применения. Методы AMIGO, ITAE позволяют разработать робастный ПИД-регулятор, имеющий малые энергозатраты на управление. Методы Зиглера — Никольса и Cohen-Coon позволяют добиться относительно хороших параметров ПИД-регулятора в целом. Метод CHR, в зависи-

мости от того, какой подход используется, по отклику на изменение уставки или перерегулирования, позволяет добиться хороших качеств, как во временной, так и в частотной областях, соответственно. Ручной метод настройки коэффициентов ПИД-регулятора позволил добиться хороших качеств управления во временной области, превосходящей все остальные методы, однако он потребовал наиболее сложных методов расчета и значительной трудоемкости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Денисенко, В. ПИД – регуляторы: вопросы реализации. Ч. 2 // Современные технологии автоматизации. – 2008. – №1. – С. 86–97.
2. Perez, J. A. Romero Extending the AMIGO tuning method to MIMO system / J. A. Romero Perez, P. Balaguer Herrero / 2nd IFAC conference on advanced PID control, Brescia (Italy). – Ed. R. Vilanova, A. Visioli. – March 28–30, 2012. – Printed by Curran Associates, Inc., 2013. – P. 211–216.
3. Astrom, K. PID Controllers: Theory, Design and Tuning / K. Astrom, T. Hagglund. – USA : The Instrumentation, Systems and Automation Society, 1995. – 343 p.
4. Маслолюбов, Ю. П. Введение в Neural Network Toolbox [Электронный ресурс] / Ю. П. Маслолюбов. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/neuralnetwork/book1/index.php>. – Дата доступа: 01.11.2020.
5. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии: ГОСТ Р 54073-2017 / ред. Л. И. Нахимова. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 36 с.

REFERENCES

1. Denisenko V. PID – regulatory: voprosy realizacii. Ch. 2 [PID-regulators: realization issues. Pt. 2.] Sovremennye tehnologii avtomatizacii, 2008, no. 1, pp. 86-97.
2. J. A. Romero Perez, P. Balaguer Herrero Extending the AMIGO tuning method to MIMO system. 2nd IFAC conference on advanced PID control, Brescia (Italy). Ed. R. Vilanova, A. Visioli. March 28-30, 2012. Printed by Curran Associates, Inc., 2013. pp. 211-216.
3. Astrom K., Hagglund T. PID Controllers: Theory, Design and Tuning. USA: The Instrumentation, Systems and Automation Society, 1995, 343 p.
4. Maslolyubov Ju. P. Vvedenie v Neural Network Toolbox [Introduction to Neural Network Toolbox], available at: <http://matlab.exponenta.ru/neuralnetwork/book1/index.php> (accessed: 01.11.2020).
5. Sistemy jelectrosnabzhenija samoletov i vertoletov. Obshhie trebovanija i normy kachestva jelektroenergii: GOST R 54073-2017 [Aircraft and helicopter power supply systems. General requirements and norms of power quality: GOST R 54073-2017]. Ed. L.I. Nahimova. Moscow, Standartinform, 2018, 36 p.

*Статья поступила в редакцию
03.11.2023*

МЕХАНИЗМЫ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ИНТЕГРАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ В ОБЩЕЕ ВОЗДУШНОЕ ПРОСТРАНСТВО

MECHANISMS FOR ASSESSING INTEGRATION SECURITY UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS IN GENERAL AIR SPACE

Скрыпник Олег Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры организации движения и обеспечения безопасности на воздушном транспорте учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
skripnikon@yandex.ru

Oleg Skrypnik – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Traffic Management and Safety in Air Transport of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
skripnikon@yandex.ru

Вишневецкий Роман Анатольевич – аспирант, старший преподаватель кафедры организации движения и обеспечения безопасности на воздушном транспорте учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
zuravka27@gmail.com

Roman Vishnevsky – Postgraduate student, Senior Lecturer of the Department of Traffic Management and Security in Air Transport of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
zuravka27@gmail.com

Аннотация: одна из особенностей развития мировой авиационной транспортной системы на современном этапе состоит в бурном развитии беспилотной авиации. Увеличение парка и сфер применения беспилотных воздушных судов обострило проблемы использования ими воздушного пространства и влияния на безопасность авиационной транспортной системы в целом. Использование воздушного пространства и интеграция в него беспилотной авиации невозможно без оценки рисков, которым могут подвергнуться критически важные объекты на земле, воздушные суда в воздухе и люди. В статье проведен анализ имеющегося опыта, а также нормативных документов международного и корпоративного уровня по возможным механизмам оценки рисков интеграции беспилотной авиации в общее воздушное пространство. Оценка операционных рисков при эксплуатации гражданских беспилотных летательных аппаратов в Республике Беларусь будет способствовать безопасному использованию воздушного пространства всеми заинтересованными пользователями и организациями в Республике Беларусь.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, общее воздушное пространство, безопасность полетов, оценка рисков, интеграция.

Abstract: one of the features of the development of the world aviation transport system at the present stage is the rapid development of unmanned aviation. The increase in the fleet and areas of application of unmanned aircraft has exacerbated the problems of their use of air space and the impact on the safety of the aviation transport system as a whole. The use of airspace and the integration of unmanned aircraft into it is impossible without an assessment of the risks that critical objects on the ground, aircraft in the air and people may be exposed to. The article analyzes the existing experience, as well as international and corporate-level regulatory documents on possible mechanisms for assessing the risks of integrating unmanned aircraft into the common airspace. The assessment of operational risks in the operation of civilian unmanned aerial vehicles in the Republic of Belarus will contribute to the safe use of airspace by all interested users and organizations in the Republic of Belarus.

Keywords: unmanned aircraft, common airspace, flight safety, risk assessment, integration.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант Т23-029).

Введение

Стремительное развитие рынков беспилотных авиационных систем (БАС), развертывание малых БАС (sUAS) для гражданских целей открывает новые возможности для повышения экономической эффективности мировой гражданской авиации и национальных авиационных транспортных систем.

Среднегодовой темп роста мирового рынка БАС с 2018 г. составил 21 % и к 2022 г. достиг 30,6 млрд долларов США, из которых 39 % сформировали страны Азии, 26 % – страны Северной Америки и 22 % – страны Европы [1].

На рынке беспилотной авиации в 2023 г. доминируют США и Китайская Народная Республика. США лидируют в сегменте оказания услуг с помощью БАС, в то время как Китай является мировым лидером в сегменте производства беспилотных воздушных судов (БВС) (более 80 % произведенных в мире БВС приходится на КНР).

Политика государств, заключающаяся в активном финансировании и планомерном прогрессирующем нормативном регулировании отрасли, позволила создать благоприятные условия для развития мирового рынка беспилотной авиации. Таким образом, в мире наблюдается устойчивая тенденция развития рынков БАС и активного использования беспилотных технологий в экономике для решения различных задач. Это направление обусловлено не только потенциалом разработчиков и изготовителей, но и условиями, создаваемыми регулируемыми органами для многоцелевой и безопасной эксплуатации БАС.

Следует особо отметить, что в обозримом будущем на БВС будут возложены новые, ответственные функции, например по перевозке важных грузов и пассажиров в рамках концепции городской аэромобильности (Urban Air Mobility). Согласно докладу исполнительного директора Европейского Агентства авиационной безопасности (EASA) Патрика Ки, при проведении Олимпийских игр в 2024 г. в Париже будет использоваться беспилотное воздушное такси. БВС под названием Velocity будет способно совершать полеты на расстояние около 20 км. Оно идеально вписывается в стратегию Европейской комиссии в отношении беспилотных летательных аппаратов. Авиационные власти Европейского союза намерены даже интегрировать аэротакси в городские транспортные системы, которые будут «умными, зелеными и цифровыми».

Развитие стратегии БАС предусматривает дальнейшее развитие европейского рынка таких систем и применение их в разных целях. При этом к 2030 г. европейский рынок БВС сможет составить 14,5 млрд евро и создать в странах – членах ЕС более 145 тысяч рабочих мест.

Быстрый рост индустрии БАС вызывает острую необходимость координации процессов, связанных с использованием ими воздушного пространства (ВП). В основе таких процессов лежит создание на международном, региональном и национальном уровне нормативно-правовой базы, с одной стороны, регулирующей эти процессы для безопасной интеграции БАС в существующую систему организации воздушного движения и контролируемое ВП, с другой – не препятствующей развитию индустрии БАС. Основная цель регулирования заключается в создании и поддержании одинаковых норм безопасности для пилотируемой и беспилотной авиации и, в то же время, обеспечения высокого уровня охраны окружающей среды.

Общие принципы риск-ориентированного подхода к интеграции беспилотных авиационных систем в воздушное пространство

Обеспечение установленного уровня безопасности полетов и снижение рисков, связанных с выполнением полетов БВС, является наивысшим приоритетом интеграции БАС в воздушное пространство. По определению ИКАО, любое воздушное судно, предназначенное для полета без пилота на борту, относится к БВС [2].

Нормативное регулирование БАС национальными авиационными администрациями должно осуществляться на основе риск-ориентированного подхода, основанного на требуемых эксплуатационных характеристиках. Риск-ориентированный подход предполагает пропорциональную зависимость уровня доступа конкретного БВС в воздушное пространство конкретного района полетной информации (РПИ) от уровня создаваемого им риска при выполнении полета.

Наиболее важными при проведении оценки эксплуатационных рисков БАС в зависимости от используемых технологий являются риски безопасности полетов. Риск безопасности полетов определен ИКАО как комбинация предполагаемой вероятности возникновения нежелательного результата при применении любого воздушного судна и связанной с ним серьезности последствий или результатов опасности [3].



Рисунок 1 – Эксплуатационные риски при интеграции БАС в ВП

К рискам безопасности полетов относится риск причинения вреда другим пользователям воздушного пространства, людям на земле и критической инфраструктуре. Другие риски, хотя и являются второстепенными, также должны приниматься во внимание при проведении оценки применимости конкретной технологии в интересах интеграции БАС с использованием риск-ориентированного подхода (рисунок 1).

Интеграция БАС не должна приводить к снижению существующего уровня безопасности полетов пилотируемой авиации, снижению уровня авиационной безопасности, увеличению риска для третьих лиц в воздухе и на земле, наземной инфраструктуры.

На основе анализа событий, имевших место на практике, наибольшие риски при эксплуатации БАС связаны с потерей управления БВС в полете и техническими отказами. В воздушном пространстве Европейского союза отмечается увеличение случаев, когда экипажи пилотируемых воздушных судов наблюдали БВС в непосредственной близости от себя.

Определение целевых показателей безопасности полетов базируется на расчетах максимально допустимой вероятности наихудшего возможного последствия, под которым предусматриваются случаи с летальным исходом при неуправляемом падении БВС на землю или столкновения БВС с пилотируемыми ВС и между собой [4]. Данная вероятность определяет целевой уровень безопасности полетов (Target Level Safety – TLS).

Когда TLS задан, технологические и технические решения должны быть разработаны таким образом, чтобы при заданной частоте возникновения опасностей частота катастроф не превышала заданный целевой уровень безопасности. Исследования по анализу международных документов ИКАО по оценке безопасности полетов БВС, а также документов таких организаций, как FAA, EASA, JARUS, GUTMA показывают, что для выполнения совместных полетов пилотируемых и БВС в контролируемом воздушном пространстве по правилам полетов по приборам целевой уровень безопасности полетов БАС должен соответствовать заданному TLS для коммерческой гражданской авиации, равному 10^{-9} за час полета для любого БВС.

Использование методологии оценки безопасности полетов БАС в соответствии с определением модели рисков безопасности полетов БВС для применения конкретного технологического решения является первым шагом в оценке применимости технологий в интересах интеграции БАС и определения целевого уровня гарантии проектирования (Design Assurance Level – DAL) бортового и наземного оборудования [3]. При этом риски вероятностей возникновения и тяжести последствий необходимо оценивать для каждой типовой полетной операции в соответствующем классе воздушного пространства или ожидаемого эксплуатационного сценария применения БАС и в конкретном РПИ.

Учитывая высокий уровень автономности БВС в будущем, отсутствие пилота на борту, для безопасного использования БАС в воздушном пространстве необходимо применять новые технические решения для авиационной экосистемы в целом и всех компонентов ее инфраструктуры. Внедрение новых сервисов аэронавигационного обслуживания при поэтапной интеграции БАС в воздушное пространство невозможно

без разработки, апробации и внедрения соответствующих технологических решений.

Основные регулирующие органы и документы по оценке операционных рисков

В соответствии с базовым регламентом, принятым в 2018 г., все БВС, независимо от их веса, подпадают под действие гармонизированных правил безопасности Евросоюза. Основываясь на этих основных требованиях безопасности и следуя ориентированному на риск подходу, заложенному в Базовом регламенте, в 2019 г. Комиссия приняла ряд правил, регулирующих операции с БАС (Имплементирующий регламент Комиссии (ЕС) 2019/947 «О правилах и процедурах эксплуатации беспилотных летательных аппаратов» и Делегированный Регламент Комиссии (ЕС) 2019/945 «Об операторах беспилотных авиационных систем»). Для обеспечения безопасности полетов БАС Комиссия приняла три имплементационных регламента в 2020 г., которые обеспечивают систему управления воздушным движением для БАС [5].

На основании проведенных исследований, принимая во внимание выводы, связанные с растущими объемами производства и использования гражданских БАС, в 2007 г. была создана международная организация JARUS (Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems), которая включала в себя группу экспертов из 44 национальных авиационных администраций, а также международных авиационных организаций в области безопасности полетов (FAA, Европейское агентство по авиационной безопасности EASA, Европейская организация по безопасности воздушной навигации и др.). В настоящее время в JARUS входят 65 организаций-членов из 63 стран, а также EASA и EUROCONTROL.

Целью создания JARUS является разработка рекомендаций по единому набору требований к БАС: требований безопасности, технических, эксплуатационных и сертификационных требований, а также рекомендаций по безопасной интеграции БАС в общее воздушное пространство и в аэродромную зону.

Семь рабочих групп JARUS разрабатывают инструктивные материалы и рекомендации для содействия национальным авиационным властям во всем мире по разработке собственных требований для регистрации, эксплуатации БАС, в том числе и оценки рисков интеграции и использования БАС в конкретном РПИ, а также для исключения дублирования функций.

По состоянию на декабрь 2022 г. рабочими группами JARUS подготовлено 33 документа.

В 2017–2019 гг. JARUS был опубликован ряд документов по оценке конкретных операционных рисков (SORA). В документах изложены и рекомендуются для использования:

- методология оценки риска для установления достаточного уровня уверенности конкретной операции БАС;
- руководящие указания по сбору и представлению информации о системе и эксплуатации для конкретной операции БАС;
- уровни целостности и гарантий мер по снижению рисков, используемых для уменьшения классов, присутствующих наземным рискам;

- стратегическая оценка по снижению риска столкновения;
- тактические меры по снижению риска столкновений;
- уровни целостности и гарантий для целей эксплуатационной безопасности.

В 2023 г. JARUS был опубликован документ «Предварительно определенные оценки риска (PDRA) 5». Этот документ был разработан с учетом растущего спроса на операции БВС при полетах за пределами визуальной видимости (BVLOS), в несегрегированном воздушном пространстве без использования наблюдателей с большей дальностью и более крупными БВС. По сравнению с операциями, которые в настоящее время регулируются национальными правилами применения БАС, возможности по внедрению беспилотной авиации станут более широко доступными для коммерческих организаций, эксплуатирующих БВС [6].

PDRA основан на SORA версии 2.0, где любые будущие изменения в этой версии SORA могут привести к изменениям положений настоящего PDRA 5.

В настоящее время инструкторный материал по SORA уже используется странами Европейского союза для оценки рисков БАС в своем РПИ (Литва, Швейцария, Германия и ряд других стран).

Оценка операционных рисков при эксплуатации гражданских беспилотных летательных аппаратов в Республике Беларусь

В настоящее время в государственном реестре воздушных судов Республики Беларусь зарегистрированы БВС крупных организаций, которые осуществляют коммерческую эксплуатацию БАС.

Коммерческие предприятия и частные организации, чья деятельность связана с разработкой, производством и эксплуатацией БАС гражданского назначения должны иметь систему управления безопасностью полетов (СУБП). Центральным компонентом СУБП является управление рисками для безопасности полетов.

Эксплуатанты БАС обязаны при коммерческом использовании БВС учитывать специфику данного сегмента авиации. При разработке и внедрении БАС в воздушное пространство Республики Беларусь необходимо иметь набор инструментов для оценки безопасного использования таких систем, а также набор корректирующих и предупреждающих мероприятий для оценки их эффективности и безопасности. Такая оценка должна выполняться в каждой организации с учетом особенностей эксплуатации и парка БАС, поэтому всегда велика роль такого экспертного оценивания. Задача обработки результатов такого оценивания может решаться различными методами. Ввиду высокого уровня неопределенности факторов опасности, естественным

инструментом может быть разработанная и адаптированная к определенному району полетов методика определения рисков при эксплуатации БАС.

Утвержденное Департаментом по авиации Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь в 2022 г. руководство по оценке операционных рисков при эксплуатации гражданских беспилотных летательных аппаратов разработано с учетом специфики РПИ и административных процедур, предусмотренных законодательными актами республики.

Документ по оценке операционных рисков при эксплуатации гражданских беспилотных летательных аппаратов (БЛА) представляет собой руководство по адаптации, которое позволяет при выполнении полетов гражданских БЛА наилучшим образом применять средства снижения рисков и, таким образом, снизить риск при выполнении полетов гражданских БЛА до приемлемого уровня. Оценка операционных рисков при эксплуатации гражданских БАС содержит не предписывающие требования, а цели, которые должны достигаться на различных уровнях обеспечения безопасности полетов [7].

Вместе с тем, следует отметить постоянную планомерную работу, проводимую ИКАО, ISO, FAA, EASA, GUTMA, международных отраслевых организаций и комитетов по стандартизации RTCA, EUROCAE, ASTM в части создания технического регулирования, разработки и испытаний технических решений, позволяющих осуществлять эксплуатацию БАС в общем воздушном пространстве без специальных ограничений. Этому способствует реализация национальных и международных программ и проектов по интеграции БАС в воздушное пространство. Разработка документов нормативного, правового и технического регулирования в ИКАО, США, странах ЕС и других зарубежных государствах обеспечивает планомерную интеграцию БАС в систему международного и национального воздушного пространства без снижения существующей производительности систем организации воздушного движения, снижения безопасности полетов или недопустимого увеличения риска для всех пользователей воздушного пространства, а также людей и имущества на земле.

Следовательно, использование передового международного опыта, успехов в нормативном, правовом и техническом регулировании, технологическом развитии в области интеграции БАС необходимо учитывать при разработке стратегии развития БАС в Республике Беларусь и концепции интеграции БАС в воздушное пространство Республики Беларусь для устранения наметившегося отставания в данной сфере и гармонизации разрабатываемых отечественных решений по нормативному, правовому и техническому регулированию БАС с международными нормами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Стратегия развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации № 1630-р от 21 июня 2023 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/407003744/?ysclid=lnradw3b7q525683838>. – Дата доступа: 31.08.2023.
2. Unmanned Aircraft Systems (UAS). Cir 328 AN/190, p. 38, 2012 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://skybrary.aero/bookshelf/icao-circular-328-unmanned-aircraft-systems-uas>. – Date of access: 31.08.2023.
3. Safety Management Manual. Doc 9859, Fourth edition, ICAO, p. 182, 2018 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://skybrary.aero/bookshelf/icao-circular-328-unmanned-aircraft-systems-uas>. – Date of access: 31.08.2023.

4. Концепции, обеспечивающие плавное включение полетов дронов в процесс организации воздушного движения. Документ AN-Conf/13-WP/168. ИКАО. 2018 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.icao.int/Meetings/anconf13/Documents/WP/wp_168_ru.pdf. – Дата доступа: 02.09.2023.
5. Имплементационный Регламент Европейской Комиссии 2019/947 от 24.05.2019 о правилах и процедурах эксплуатации беспилотных летательных аппаратов. Агентство по авиационной безопасности Европейского Союза – EASA. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/73680263/4d6cc5b8235f826b2c67847b967f8695/> – Дата доступа: 15.08.2023.
6. JARUS guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA), JAR-doc-06, ed. 2.0, 30.01.2019 Rev 1 [Electronic resource] : – Mode of access: <https://www.eurocockpit.be/positions-publications/specific-operations-risk-assessment-sora>. – Date of access: 15.08.2023.
7. Руководство по оценке операционных рисков при эксплуатации гражданских беспилотных летательных аппаратов. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://caa.gov.by/uploads/files/Rukovodstvo-po-otsenke-operatsionnyh-riskov-pri-ekspluatatsii-grazhdanskix-BLA-1.pdf>. – Дата доступа: 04.09.2023.

REFERENCES

1. Strategiya razvitiya bespilotnoj aviacii Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda i na perspektivu do 2035 goda. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii № 1630-r ot 21 iyunya 2023 g. available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/407003744/?ysclid=lnradw3b7q525683838s> (accessed 31.08.2023).
2. Unmanned Aircraft Systems (UAS). Cir 328 AN/190, p.38, 2012, available at: <https://skybrary.aero/bookshelf/icao-circular-328-unmanned-aircraft-systems-uas> (accessed 31.08.2023).
3. Safety Management Manual. Doc 9859, Fourth edition, ICAO, p. 182, 2018, available at: <https://skybrary.aero/bookshelf/icao-circular-328-unmanned-aircraft-systems-uas> (accessed 31.08.2023).
4. Концепции, обеспечивающие плавное включение полетов дронов в процесс организации воздушного движения. Документ AN-Conf/13-WP/168, ICAO, 2018, available at: https://www.icao.int/Meetings/anconf13/Documents/WP/wp_168_ru.pdf (accessed 02.09.2023).
5. Commission Implementation Regulation (EU) 2019/947 of 24 May 2019 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft. Official Journal of the European Union, L152, pp. 45-70, 2019. available at: http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2019/947/oj (accessed 15.08.2023).
6. JARUS guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA), JAR-doc-06, ed. 2.0, 30.01.2019 Rev 1, available at: <https://www.eurocockpit.be/positions-publications/specific-operations-risk-assessment-sora> (accessed 15.08.2023).
7. Руководство по оценке операционных рисков при эксплуатации гражданских беспилотных летательных аппаратов. available at: <https://caa.gov.by/uploads/files/Rukovodstvo-po-otsenke-operatsionnyh-riskov-pri-ekspluatatsii-grazhdanskix-BLA-1.pdf> (accessed 04.09.2023).

*Статья поступила в редакцию
21.09.2023*

РАСЧЕТ ТРАЕКТОРИИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ МАКСИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ РАЗВЕДКИ

CALCULATION OF THE TRAJECTORY OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE PROVIDING MAXIMUM VALUES OF THE PROBABILITIES OF SUCCESSFUL OVERCOMING DIFFICULT TERRAIN AND DETECTING AN AIR RECOVERY OBJECT

Санько Андрей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры воздушных судов и авиационного оборудования военного факультета учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь

Andrey Sanko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Aircraft and Aviation Equipment Department of the Military Faculty of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus

Шейников Алексей Александрович – кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры авиационной техники и вооружения авиационного факультета учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Республика Беларусь

Aliaksey Sheinikov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Doctoral Student of Aviation Equipment and Weapons Department of Military Academy of the Republic of Belarus, Republic of Belarus

Аннотация: в статье представлен алгоритм расчета траектории полета беспилотного летательного аппарата, одновременно обеспечивающей максимальную вероятность преодоления сложного рельефа местности и максимальную вероятность обнаружения объекта воздушной разведки. Задача решалась в два этапа. На первом этапе проводилось вычисление значения максимальной вероятности обнаружения объекта воздушной разведки с учетом значений вероятностей: выполнения задачи воздушной разведки в зависимости от типа подстилающей местности; от наличия, характеристик и количества препятствий, находящихся в районе поиска; характеристик системы обнаружения цели движущимся беспилотным летательным аппаратом. При помощи функции Розенброка создается графическая карта значений вероятности обнаружения объекта воздушной разведки. На втором этапе для расчета оптимальной траектории движения беспилотного летательного аппарата был использован метод Вороного. Находятся линии (ребра графа), движение по которым обеспечивает минимальную вероятность столкновения с препятствиями, находящимися в районе поиска, и максимальную вероятность обнаружения цели. Для нахождения минимального расстояния от начальной до конечной точки, был использован алгоритм Дейкстры, позволяющий находить кратчайшее расстояние между вершинами графа. **Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, траектория полета, методы Вороного, алгоритм Дейкстры, воздушная разведка.

Abstract: the article presents an algorithm for calculating the flight path of an unmanned aerial vehicle, which simultaneously provides the maximum probability of overcoming complex terrain and the maximum probability of detecting an aerial reconnaissance object. The problem was solved in two stages. The first stage involved calculating the value of the maximum probability of detecting an aerial reconnaissance object, taking into account the probabilities of completing an aerial reconnaissance task depending on the type of underlying terrain; on the presence, characteristics and number of obstacles in the search area; characteristics of a target detection system for a moving UAV. Using the Rosenbrock function, a graphical map of the probability values of detecting an aerial reconnaissance object is created. At the second stage, the Voronoi method was used to calculate the optimal trajectory of the UAV. Lines (graph edges) are found, movement along which ensures a minimum probability of collision with obstacles located in the search area and a maximum probability of target detection. To find the minimum distance from the start to the end point, Dijkstra's algorithm was used, which allows you to find the shortest distance between the vertices of the graph.

Keywords: unmanned aerial vehicle, flight trajectory, Voronoi methods and Dijkstra's algorithm, aerial reconnaissance.

Введение

Проблема эффективного поиска наземных объектов является актуальной при решении задач оптической воздушной разведки беспилотными летательными аппаратами (БЛА) [1]. Одной из важных задач в этой сфере является разработка методов определения наилучшего плана поиска [2], одновременно обеспечивающего максимальную вероятность преодоления сложного рельефа местности [4] (минимальную вероятность столкновения с препятствиями, находящимися в районе поиска) и максимальную вероятность обнаружения объекта воздушной разведки (ОВР) [3], находящегося в районе поиска. При этом следует учитывать, что ОВР могут быть как неподвижными (здания, сооружения), так и подвижными (люди, автомобили, тяжелая техника), т. е. изменяющими координаты своего местоположения в процессе обследования БЛА района поиска.

Постановка задачи

Требуется разработать алгоритм расчета траектории полета БЛА, при которой одновременно обеспечиваются минимальная вероятность столкновения с препятствиями, находящимися в районе поиска, и максимальная вероятность обнаружения объекта воздушной разведки с учетом ограничения по дальности полета БЛА (длина траектории полета между заданными точками старта и финиша должна быть минимально возможной при соблюдении рассмотренных выше условий).

Решение задачи

Для решения задачи использовались положения теории поиска [5]. Принималось, что поиск цели представляет собой дискретный случайный процесс (т. е. цель может быть обнаружена лишь в определенные случайные дискретные моменты времени). Вероятность обнаружения цели движущимся БЛА за время t с учетом того, что курс цели (также находящейся в движении)

фиксирован и ее местоположение равновероятно в заданном районе поиска, находится как отношение обследуемой за время t площади ко всей площади района поиска [5]:

$$P_{\text{обн}}(t) = \frac{2R_{\text{обз}} \cdot W_t}{S_0}, \quad (1)$$

где S_0 – площадь района поиска;

$R_{\text{обз}}$ – радиус обзора бортовым средством технического наблюдения;

W – скорость цели относительно наблюдателя.

Скорость цели относительно наблюдателя можно рассчитать следующим образом:

$$W = \sqrt{V_{\text{ц}}^2 + V_{\text{н}}^2 - 2V_{\text{ц}}V_{\text{н}} \cos \psi}, \quad (2)$$

где $V_{\text{ц}}$ – скорость цели относительно земли;

$V_{\text{н}}$ – скорость наблюдателя относительно земли;

ψ – курс цели относительно наблюдателя (угол, отсчитываемый от линии движения наблюдателя).

В свою очередь, $R_{\text{обз}}$ зависит от характеристик бортовых средств технического наблюдения (от размера пикселя бортовой цифровой камеры μ , фокусного расстояния объектива цифровой камеры ξ , количества пикселей в цифровой матрице камеры (разрешения камеры) n) и от высоты полета БЛА H (рисунок 1):

$$R_{\text{обз}} = \frac{\mu \cdot H}{\xi} n. \quad (3)$$

В идеальных условиях (с учетом равновероятности местоположения цели в заданном районе поиска) в качестве способа поиска цели одиночным БЛА обычно выбирается параллельное галсирование (рисунок 2).

Известно, что на эффективность воздушной разведки сильно влияют тип местности и наличие в районе поиска различных препятствий (высокоэтажных зданий, сооружений, ЛЭП и т. д.) [6]. Исходя из этого целесообразно рассчитывать также вероятность выполнения задачи воздушной разведки (обнаружение цели в районе поиска) в зависимости от типа подстилающей местности ($P_{\text{тм}} = f(x, y)$, где x, y – координаты цели



Рисунок 1 – Зависимость радиуса обзора от характеристик бортовых средств технического наблюдения и высоты полета

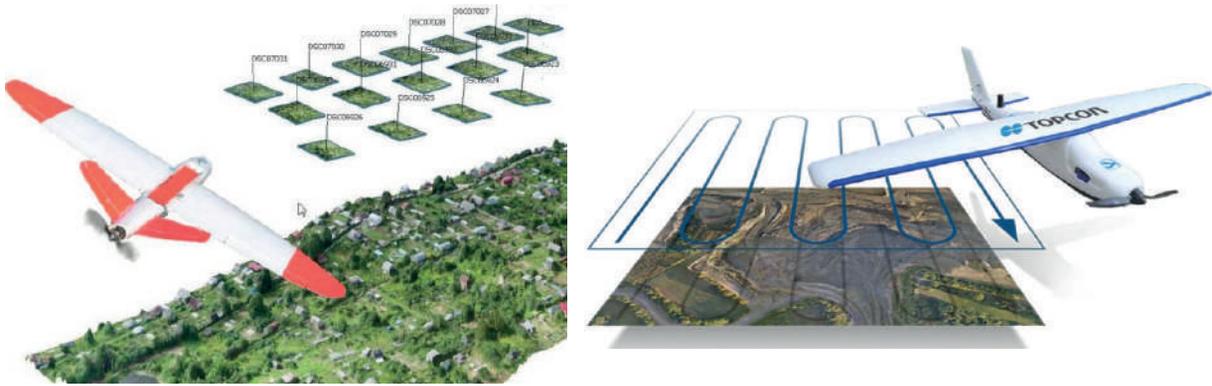


Рисунок 2 – Параллельное галсирование, как способ поиска цели в заданном районе

в районе поиска) и вероятность выполнения задачи воздушной разведки в зависимости от наличия, характеристик и количества препятствий находящихся в районе поиска ($P_{\text{ПРИП}} = f(x, y)$).

Например, $P_{\text{ТМ}}$ может принимать следующие значения: 1 – степь; 0,7 – хвойный лес; 0,4 – лиственный лес; 0,3 – кустарник. Таким образом, полная вероятность выполнения задачи воздушной разведки можно рассчитать по формуле

$$P_{\text{ВБЗ}} = P_{\text{обн}} P_{\text{ТМ}} P_{\text{ПРИП}} \quad (4)$$

Для расчета $P_{\text{ТМ}} = f(x, y)$ используется типовая функция Розенброка (5), при этом на топографической карте исследуемого участка местности (рисунок 3) предварительно выделяются зоны значений вероятности обнаружения цели в зависимости от типа местности, коэффициенты функции задаются оператором

$$P_{\text{ТМ}} = 1 - \frac{1}{1 + (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} + \dots + \frac{1}{2 + (x - x_N)^2 + (y - y_N)^2}, \quad (5)$$

где (x_1, \dots, x_N) , (y_1, \dots, y_N) – заданные пользователем координаты центров зон с определенным типом местности.

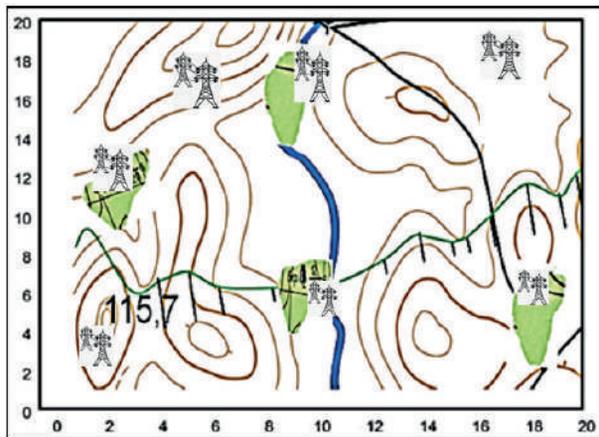


Рисунок 3 – Топографическая карта исследуемого участка местности

Например (рисунок 4):

$$P_{\text{ТМ}} = 1 - \frac{1}{1 + (x - 2)^2 + (y - 10)^2} + \frac{1}{1 + (x - 2)^2 + (y - 10)^2} + \frac{1}{2 + (x - 10)^2 + (y - 15)^2} + \frac{1}{2 + (x - 18)^2 + (y - 4)^2} + \frac{1}{2 + (x - 10)^2 + (y - 5)^2}. \quad (6)$$

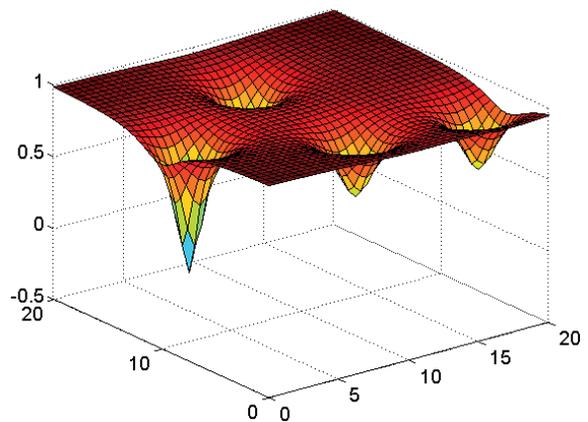
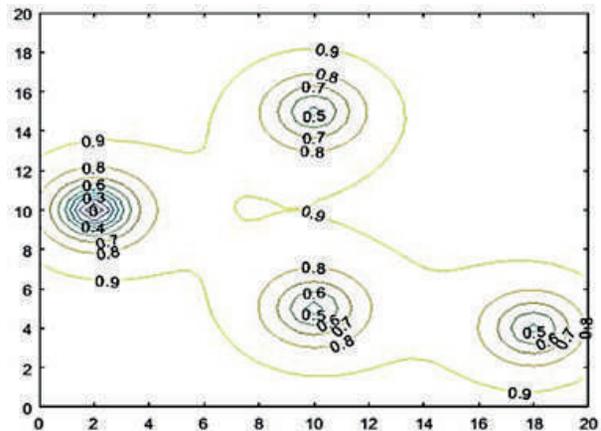


Рисунок 4 – Распределение значений $P_{\text{ТМ}}$ в зависимости от типа местности в районе поиска

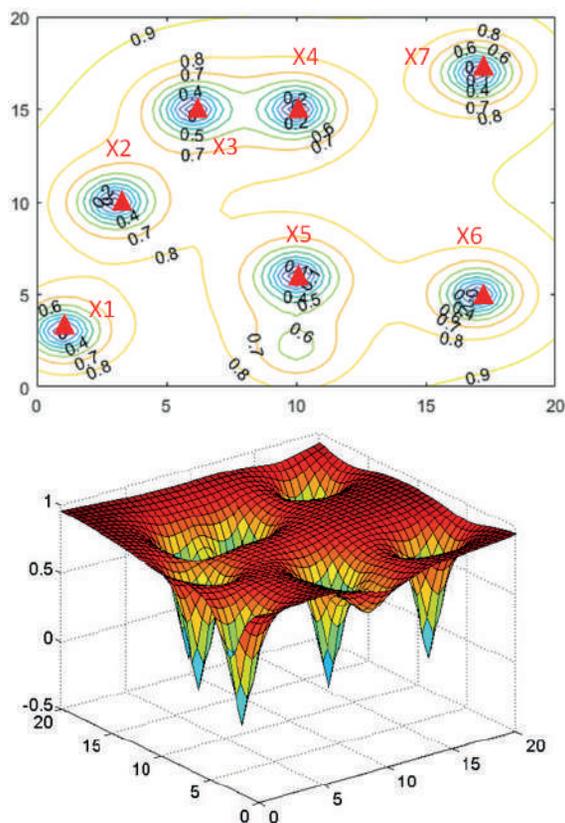


Рисунок 5 – Распределение значений $P_{\text{прип}}$ в зависимости от координат расположения ЛЭП

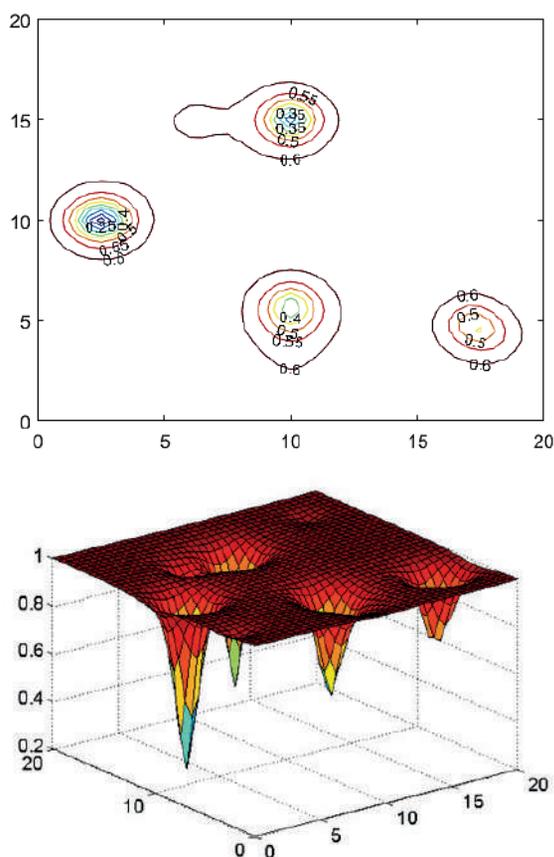


Рисунок 6 – Распределение значений $P_{\text{вбз}}$ при заданных условиях моделирования

Значения вероятности РПРИП рассчитываются с учетом известных координат расположения препятствий (для примера заданы координаты семи идентичных друг другу препятствий – вышки ЛЭП) (рисунок 3):

$$P_{\text{прип}} = 1 - \frac{1}{1 + (x-10)^2 + (y-15)^2} + \frac{1}{3 + (x-10)^2 + (y-2)^2} + \frac{1}{1 + (x-6)^2 + (y-15)^2} + \frac{1}{1 + (x-1)^2 + (y-3)^2} + \frac{1}{1 + (x-17)^2 + (y-5)^2} + \frac{1}{1 + (x-10)^2} + \frac{1}{1 + (x-10)^2 + (y-6)^2} + \frac{1}{1 + (x-3)^2} + \frac{1}{1 + (y-10)^2} + \frac{1}{3 + (x-17)^2 + (y-17)^2}. \quad (7)$$

Подставляя выражения (6) – (7) в (4), можно получить значения полной вероятности выполнения задачи воздушной разведки (рисунок 5). При этом $P_{\text{вбз}}$ в выражении (4), нормируется к единице.

Для проведения имитационного моделирования в качестве начальных условий были выбраны: $S_0 = 20$ км; $V_{\text{н}} = 20$ км/ч; $V_{\text{к}} = 150$ км/ч; $\psi = 180$ град; $t = 5$ ч; $R_{\text{обн}} = 2$ км. При решении оптимизационной задачи были получены несколько координат точек на карте, где полная вероятность выполнения задачи воздушной разведки $P_{\text{вбз}}$ минимальна (рисунок 6).

В настоящее время для расчета оптимальной траектории движения БЛА, используются различные алгоритмы: аналитико-числовой матричный алгоритм планирования траектории [2], метод Вороного [7], метод случайного дерева (RRT) и его модификации [8], нейросетевые алгоритмы планирования [9], частично целочисленное линейное программирование и т. д.

Исходя из рассмотренных выше условий, в качестве базового алгоритма расчета оптимальной траектории движения БЛА был выбран алгоритм Вороного, как самый простой в вычислительном плане [8, 10]. В процессе построения оптимальной траектории по алгоритму Вороного, области карты геометрически разбиваются на многоугольники, обладающие следующим свойством: для любого центра карты [локального минимума функции (4)] можно указать область пространства (локус), все точки которой ближе к данному центру, чем к любому другому центру. В результате работы алгоритма карта разбивается на локусы, ребра которых представляют собой линии, равноудаленные от выбранных центров. Таким образом, при движении по ребрам, исключается возможность попадания в вершины карты $X_1 - X_4$ (во впадины графика распределения значений $P_{\text{вбз}}$).

Результаты моделирования представлены на рисунке 7, где L – это длина траектории полета БЛА от точки старта до точки финиша.

Начальные и конечные точки маршрута выбираются случайным образом и могут не лежать на ребрах. Соответственно, на ребрах графа Вороного не лежат и начальные (конечные) участки траектории (участок от ближайшего ребра графа до начальной или конечной точки траектории). С целью минимизации длины маршрута БЛА рассматриваемые участки выбирались прямыми.

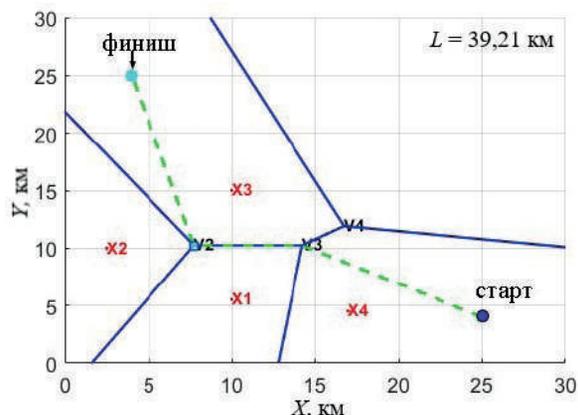
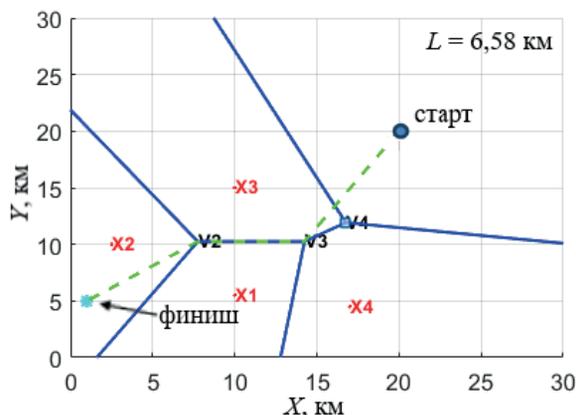


Рисунок 7 – Граф Вороного и расчетная траектория движения БЛА при различных исходных данных

Для нахождения минимального расстояния от начальной до конечной точки маршрута (при условии необходимости движения по ребрам диаграммы Вороного) был использован алгоритм Дейкстры [8, 11], позволяющий находить кратчайшее расстояние между вершинами графа. Алгоритм Дейкстры предполагает пошаговый перебор всех вершин графа и назначение им меток V_i , которые характеризуют минимальные расстояния от выбранной вершины до каждой из остальных вершин графа. Для нахождения минимального расстояния между начальным положением БЛА $P(x_{нт}, y_{нт})$ и целью использовалось Евклидово расстояние

$$W_i = \min \sqrt{(x_{V_g}^i + x_{нт})^2 + (y_{V_g}^i + y_{нт})^2}, \quad (8)$$

где x_{V_i}, y_{V_i} – координаты вершин графа на карте;
 $i = 1...M$ – количество вершин графа.

Предлагаемый алгоритм расчета траектории полета БЛА при условии обеспечения его минимальной вероятности столкновения с препятствиями, находящимися в районе поиска и максимальной вероятности обнаружения цели:

1. На топографической карте:

- выделяются зоны значений вероятности обнаружения цели в зависимости от типа местности;
- с учетом типа местности строится функция (6)

$$k_3 = f(x, y);$$

- с учетом расположения препятствий строится функция (7) $k_4 = f(x, y)$.

2. Выражения (6), (7) подставляются в (4) с целью получения значений $P_{вбз} = f(x, y)$.

3. Производится нормировка к единице $P_{вбз}$ (4) при максимальных значениях $S_{0r}, V_{цr}, V_{нr}, \psi, t, R_{обн}$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Виды и средства иностранных технических разведок: учебное пособие / Ю. К. Меньшаков, Н. И. Глузов, М. П. Сычев – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 656 с.
2. Тань, Лиго. Аналитико-числовой матричный алгоритм планирования траектории движения БЛА / Лиго Тань, А. В. Фомичев // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2016. – № 2. – С. 53–66.
3. Николаев, С. В. Определение в испытаниях вероятности обнаружения наземных объектов с борта летательного аппарата / С. В. Николаев // Научный вестник МГТУ ГА. – 2017. – Том 2 – № 05. – С. 131–144.
4. Маргель, А. Б. Особенности боевого применения беспилотных летательных аппаратов в локальных войнах и вооруженных конфликтах / А. Б. Маргель, О. А. Хожевец // Противодействие ударным БЛА, проблемы и пути их решения : сб. материалов круглого стола ВВС и войск ПВО – Минск, 2018. – С. 10.
5. Мильграм, Ю. Г. Исследование операций и алгоритмизация боевых действий / Ю. Г. Мильграм. – М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1968. – 460 с.
6. Макаренко, С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам / С. И. Макаренко. – СПб.: Научное издание, 2020. – 204 с.

4. С использованием метода Вороного находят линии (ребра графа), движение по которым обеспечивает минимальную вероятность столкновения с препятствиями, находящимися в районе поиска, и максимальную вероятность обнаружения цели.

5. С учетом заданных точек старта и финиша, а также с учетом полученной диаграммы Вороного строится оптимальная траектория полета БЛА.

Заключение

В результате проведенных исследований разработан алгоритм расчета оптимальной траектории полета БЛА, обеспечивающей максимальную вероятность преодоления сложного рельефа местности и максимальную вероятность обнаружения объекта воздушной разведки. Алгоритм отличается совместным применением положений теории поиска, методов Вороного и Дейкстры при построении оптимальной траектории полета БЛА с учетом характеристик бортовых средств обнаружения, параметров движения объекта воздушной разведки, параметров полета БЛА, типа местности и наличия на маршруте препятствий, что позволяет обеспечить максимальное значение вероятности успешного выполнения задачи воздушной разведки в заданном районе поиска.

Разработанный алгоритм может быть использован в автоматизированных системах поддержки принятия решения операторов БЛА, для повышения эффективности воздушной разведки и обеспечения безопасности полетов в промышленных районах.

7. Соловьев, В. В. Планирование траектории подвижного объекта с применением диаграммы Вороного / В. В. Соловьев, И. О. Шаповалов, В. В. Шадрина // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 3. – С. 29–40.
8. У, Рэндал. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика / Рэндал У, Биард, Тимоти У, МакЛэйн. – М. : Техносфера, 2015. – 312.
9. Михайлин, Д. А. Нейросетевой алгоритм безопасного облета воздушных препятствий и запрещенных наземных зон / Д. А. Михайлин // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2017. – Т. 20. – № 4. – С. 18–24.
10. Пантелеев, А. В. Методы глобальной оптимизации. Метаэвристические стратегии и алгоритмы / А. В. Пантелеев, Д. В. Метлицкая, Е. А. Алешина. – М. : Вузовская книга, 2013. – 244 с.
11. Берцун, В. Н. Математическое моделирование на графах / В. Н. Берцун. – Томск : Изд-во Том. Ун-та, 2013. – Ч. 2. – 88 с.

REFERENCES

1. Men'shakov Ju.K., Glumov H.I., Sychev M.P. Vidy i sredstva inostrannykh tehnicheskikh razvedok [Types and means of foreign technical intelligence]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2009, 656 p.
2. Tan' Ligo, Fomichev A.V. Analitiko-chislovoj matrichnyj algoritm planirovanija traektorii dvizhenija bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Analytical-numerical matrix algorithm for UAV trajectory planning] Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering. 2016, no. 2, pp. 53-66.
3. Nikolaev S.V. Opredelenie v ispytaniyah verojatnosti obnaruzhenija nazemnykh ob'ektov s borta letatel'nogo apparata [Determination in tests of the probability of detecting ground objects from an aircraft] Civil Aviation High Technologies (Nauchnyj vestnik MGTU GA), 2017, vol. 2, no. 5, pp. 131-144.
4. Marget' A.B., Hozhevec O.A. Osobennosti boevogo primeneniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov v lokal'nykh vojnakh i vooruzhennykh konfliktakh [Features of the combat use of unmanned aerial vehicles in local wars and armed conflicts]. Protivodejstvie udarnym bespilotnym letatel'nykh apparatam, problemy i puti ih reshenija: sbornik materialov kruglogo stola voenno-vozdushnykh sil i vojsk protivovozdushnoj oborony, Minsk, 2018, p. 10.
5. Mil'gram Ju.G. Issledovanie operacij i algoritimizacija boevykh dejstvij [Operations research and algorithmization of combat operations]. Moscow: Voennovo-vozdushnaja akademiya imeni professora N.E. Zhukovskogo i Ju.A. Gagarina, 1968, 460 p.
6. Makarenko S.I. Protivodejstvie bespilotnym letatel'nykh apparatam [Countering unmanned aerial vehicles]. Saint Petersburg: Naukoemkie tehnologii, 2020, 204 p.
7. Solov'ev V.V., Shapovalov I.O., Shadrina V.V. Planirovanie traektorii podvizhnogo objekta s primeneniem diagrammy Voronogo [Planning the trajectory of a moving object using the Voronoi diagram]. IZVESTIYA SFedU. ENGINEERING SCIENCES, 2014, no. 3, pp. 29-40.
8. Rjendal U, Biard Timoti, MakLjejn U Malye bespilotnye letatel'nye apparaty: teorija i praktika [Small unmanned aerial vehicles: theory and practice]. Moscow: Tehnosfera, 2015, 312 p.
9. Mihajlin D.A. Nejrosетеvоj algoritm bezopasnogo obleta vozdušnykh prepjatstvij i zapreshennykh nazemnykh zon / D.A. Mihajlin // Civil Aviation High Technologies (Nauchnyj vestnik MGTU GA), 2017, vol. 20, no. 4, pp. 18-24.
10. Panteleev A.V., Metlickaja D.V., Aleshina E.A. Metody global'noj optimizacii. Metaevristicheskie strategii i algoritmy [Global optimization methods. Metaheuristic strategies and algorithms]. Moscow: Vuzovskaja kniga, 2013, 244 p.
11. Bercun V.N. Matematicheskoe modelirovanie na grafah. Chast' 2 [Mathematical modeling on graphs. Part 2]. Tomsk: Tomskij gosudarstvennyj universitet, 2013, 88 p.

*Статья поступила в редакцию
19.09.2023*

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПОЛЕТОВ ОРГАНИЗАЦИЙ РАЗРАБОТЧИКОВ И ИЗГОТОВИТЕЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

MODELING OF THE FLIGHT SAFETY MANAGEMENT SYSTEM OF ORGANIZATIONS OF DEVELOPERS AND MANUFACTURERS OF AVIATION EQUIPMENT

Самуленков Юрий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации», Российская Федерация
yu.samulenkov@mstuca.aero

Богомолв Дмитрий Валерьевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации», Российская Федерация
d.bogomolov@mstuca.aero

Тоиров Илхом Сафарович – аспирант кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации», Российская Федерация
aviator-caatj@mail.ru

Yuri Samulenkov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Operation of Aircraft and Aircraft Engines of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow State Technical University of Civil Aviation", Russian Federation
yu.samulenkov@mstuca.aero

Dmitry Bogomolov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Operation of Aircraft and Aircraft Engines of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow State Technical University of Civil Aviation", Russian Federation
d.bogomolov@mstuca.aero

Ilkhom Toirov – Postgraduate Student of the Department of Technical Operation of Aircraft and Aircraft Engines of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow State Technical University of Civil Aviation", Russian Federation
aviator-caatj@mail.ru

Аннотация: в работе выполнен анализ международной и российской нормативно-правовой базы в области управления безопасностью полетов и поддержания летной годности воздушных судов, разработана топологическая модель системы управления безопасностью организаций разработчиков и изготовителей авиационной техники. Авторами рассмотрены основные методы оценки рисков авиационных событий в авиационных организациях и в качестве основного метода выбран марковский анализ, который может быть описан в терминах множества дискретных состояний и переходов между ними, если эволюция от ее текущего состояния не зависит от ее состояния в любое время в прошлом. Такие технологии используются на этапах оценки риска для идентификации, анализа и сравнительной оценки риска. Одним из преимуществ данного метода является возможность формализации и прогнозирования поведения системы в будущем, выбор оптимальных параметров в ожидаемых условиях эксплуатации. Предложенная математическая модель может использоваться разработчиками и изготовителями авиационной техники при формировании и совершенствовании системы управления безопасностью полетов.
Ключевые слова: безопасность полетов, полумарковские процессы, разработчики и изготовители авиационной техники, неопределенность, риск, ожидаемые условия эксплуатации.

Abstract: the paper analyzes the international and Russian regulatory framework in the field of flight safety management and aircraft airworthiness maintenance, a topological model of the safety management system of organizations of developers and manufacturers of aviation equipment is developed. The authors considered the main methods of assessing the risks of aviation events in aviation organizations and selected Markov analysis as the main method, which can be described in terms of a set of discrete states and transitions between them, if the evolution from its current state does not depend on its state at any time in the past. Such technologies are used at risk assessment stages for identification, analysis and comparative risk assessment. One of the advantages of this method is the ability to formalize and predict the behavior of the system in the future, the choice of optimal parameters in the expected operating conditions. The proposed mathematical model can be used by developers and manufacturers of aviation equipment in the formation and improvement of the flight safety management system.

Keywords: flight safety, semi-Markov processes, developers and manufacturers of aviation equipment, uncertainty, risk, expected operating conditions.

Введение

Безопасность полетов (БП) является одной из ключевых составляющих безопасности авиационной деятельности авиационной транспортной системы. Вопросы БП составляют основное содержание стандартов и рекомендуемой практики (SARPs) ИКАО, содержащихся в ряде приложений к Конвенции о международной гражданской авиации 1944 г. [1–3]. В настоящее время вопросы управления безопасностью в наибольшей степени проработаны именно в части управления БП как на государственном уровне, так и на уровне авиационных организаций. Государство взяло на себя обязанности по выполнению SARPs, относящихся к управлению БП. Разработчики, изготовители воздушных судов (ВС) и организации по техническому обслуживанию (ТО) ВС с точки зрения SARPs [3] могут в рамках своей системы управления безопасностью полетов (СУБП) принять для себя и более жесткие требования, если определят, что это будет оправдано на этапе эксплуатации ВС.

Риск для безопасности полетов определяется как предполагаемая **вероятность** и серьезность последствий или результатов опасности.

Авиационные события подразделяются на авиационные происшествия, инциденты и производственные происшествия [4].

Государственная Программа безопасности полетов (ГосПБП) включает следующие компоненты [5, 6]:

- а) государственная политика и цели обеспечения БП;
- б) управление рисками для БП на государственном уровне;
- в) обеспечение БП на государственном уровне;
- г) популяризация вопросов БП на государственном уровне.

Разделение компетенций СУБП в рамках государства, разработчика и изготовителя авиационной техники (АТ), поставщика услуг и информационного обеспечения [7–9] представлено на рисунке 1.

Риск для БП – оценка последствий фактора опасности, выраженная в виде прогнозируемой вероятности или возможности и серьезности, при этом за контрольный ориентир принимается наихудшая предвидимая ситуация.

Управление факторами риска для БП охватывает оценку и уменьшение факторов риска для БП. Целью управления факторами риска для БП является оценка рисков, связанных с выявленными опасными факторами, а также разработка и реализация эффективных предупреждающих и корректирующих воздействий.

Нормативно-правовая база в области летной годности воздушных судов и безопасности полетов

Основной целью исследования является создание математической модели СУБП организаций разработчиков и изготовителей АТ. Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие задачи: выполнить анализ международной, отечественной научной и нормативной базы по вопросам БП и методам оценки рисков в организациях разработчиков и изготовителей АТ; построить граф состояний БП организаций разработчиков и изготовителей АТ; создать математическую модель СУБП организаций разработчиков и изготовителей на основе полумарковских процессов.

В нормативно-правовых актах по БП [7], технической эксплуатации ВС [8], надежности изделий [9] приведены основные понятия, определения, показатели эффективности проектируемой системы: вероятность отсутствия авиационного происшествия (АП), вероятность АП; вероятность особой ситуации в полете; вероятность особой ситуации за 1 ч полета; вероятность безотказной работы и др.

В настоящее время БП все в большей степени рассматривается как контроль факторов неопределенности и риска авиационной системы [10, 11].

Существует более 40 методов оценки неопределенностей и рисков возникновения случайных событий [11].

Одним из наиболее распространенных методов оценки рисков наступления событий в авиационных организациях являются технологии «Матрица последствий/вероятности (матрица рисков или тепловая карта)» (таблица 1) и «Анализ дерева событий» (рисунок 2).

К достоинствам данного метода следует отнести простоту и наглядность, но сложность формализации исключает возможность прогнозирования рисков.

В организации разработчика и изготовителя должно быть разработано и утверждено Руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП), где должны

быть определены политика и цели обеспечения БП, обязанности и должностная ответственность руководства организации в области БП, процедуры управления рисками для БП (выявление источников опасности для БП, оценка и уменьшение рисков), осуществление изменений и постоянное совершенствование СУБП. СУБП Разработчика основывается на требованиях международных и российских нормативно-правовых актов [3, 12].

Несомненными достоинствами метода «Анализ дерева событий» являются возможность формализации и наглядность, но метод рассматривает только исправные и неисправные состояния системы, а для



Рисунок 1 – Система управления безопасностью полетов

Таблица 1 – Матрица рисков или тепловая карта

Вероятность (частота) наступления события	Серьезность возможных неблагоприятных воздействий				
	A	B	C	D	E
	Катастрофическая	Аварийная ситуация	Сложная ситуация	Усложнение условий полета	Предпосылки к усложненным условиям полета
5 часто	5A	5B	5C	5D	5E-A,B
4 периодически	4A	4B	4C	4D	4E-A,B
3 редко	3A	3B	3C	3D	3E-A,B,C
2 маловероятно	2A	2B	2C	2D	2E-A,B,C
1 ничтожная	1A	1B	1C	1D	1E-A,B,C

сложных систем дерево событий сложно построить с нуля.

В связи с указанными достоинствами и недостатками рассмотренных методов, в данном исследовании для оценки рисков БП предлагается использовать марковский анализ с дискретными состояниями и непрерывным временем.

Для эффективного управления летной годностью и БП в организациях разработчиков и изготовителей АТ должны быть созданы и поддерживаться в актуализированном состоянии системы обеспечения качества и СУБП, кроме разработчиков и изготовителей компонентов II и III класса [13].

В соответствии с требованиями международных и российских нормативно-правовых актов [2, 12–16] обязательной сертификации в гражданской авиации подлежат пилотируемые ВС, беспилотные авиационные системы и ее элементы, авиационные двигатели, воздушные винты, бортовое авиационное оборудование, свободные аэростаты, дирижабли.

В общем случае остаточный риск БП, связанный с ВС на этапах разработки, производства и эксплуатации [16] рассчитывается по формуле

$$P_{\text{вс}} = F(t, P_{t_{\text{вс}}}, P_{T_{\text{првс}}}, P_{T_{\text{тзвс}}}), \quad (1)$$

где $P_{t_{\text{вс}}}$ – остаточный риск, связанный с типовой конструкцией ВС;

$P_{T_{\text{првс}}}$ – остаточный риск, связанный с недостатками изготовления ВС;

$P_{T_{\text{тзвс}}}$ – остаточный риск, связанный с недостатками технической эксплуатации ВС.

Остаточный риск, связанный с типовой конструкцией воздушного судна, является функцией всех авиационных рисков, возникающих в ходе проектирования: а) риски, связанные с ожидаемыми условиями эксплуатации (ОУЭ); б) риски, связанные с компетентностью разработчика ВС; в) риски, связанные с сертификацией типа ВС; г) риски, связанные с действующей у разра-

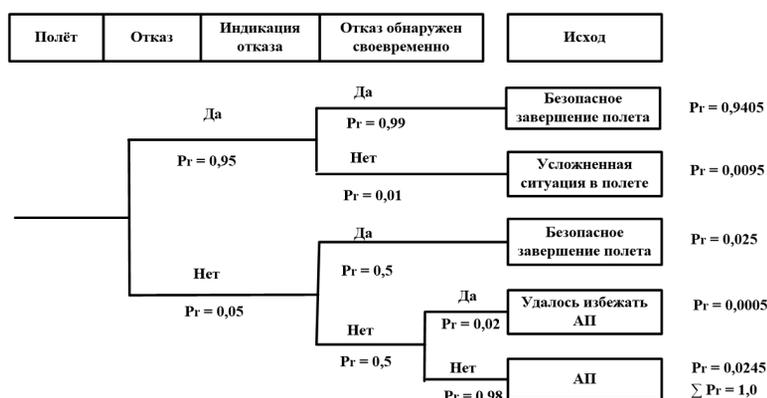


Рисунок 2 – Анализ дерева событий

ботчика системой менеджмента качества, в том числе, относящейся к обеспечению качества проектирования; д) риски, связанные с действующей у разработчика системой управления безопасностью находящихся в эксплуатации разработанных им ВС.

Риски, связанные с ОУЭ ВС, вызванные природными явлениями, представлены на рисунке 3 [10, 11].

Сложность природных явлений и случайный характер протекающих в них процессов порождает высокую степень неопределенности параметров состояния и воздействия внешней среды на ВС. Выбор ОУЭ ВС определяет, насколько безопасным будет данное ВС в эксплуатации.

Математическая модель системы управления безопасностью полетов организаций разработчиков и изготовителей авиационной техники

Анализ технологий оценки появления случайных событий позволяет сделать вывод, что одним из наиболее действенных методов является марковский анализ, позволяющий не только оценивать текущее состояние безопасности полетов с учетом различных факторов, но и на основе имитационного моделирования (розыгрыша) делать прогноз состояния СУБП.

Для имитационного моделирования БП на основе полумарковских процессов авторами разработан граф

состояния СУБП, включающий 15 состояний (рисунок 4).

При описании случайного процесса, протекающего в этой системе, применяются вероятности состояний [17 – 19]

$$p_1(t), p_2(t), \dots, p_i(t), \quad (2)$$

где $p_i(t)$ – вероятность того, что система S в момент t находится в состоянии S_i .

Очевидно, что для любого t

$$\sum_{i=1}^n p_i(t) = 1. \quad (3)$$

Для нахождения вероятностей необходимо решить систему дифференциальных уравнений (уравнений Колмогорова), имеющих вид

$$\begin{aligned} \frac{dp_i(t)}{dt} = & \sum_{j=1}^n \lambda_{ji}(t) P_j(t) - \\ & - \sum_{j=1}^n \lambda_{ij}(t) P_i(t); \\ & (i, j = 1, 2, \dots, n), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\lambda_{ij} P_j(t)$ поток вероятности перехода из состояния S_j в состояние S_i .

Функция λ_{ij} описывает закон перехода ВС из состояния i в состояние j , и в этом случае она представляет собой условную вероятность перехода при нахождении объекта в состоянии i .

Зачастую делают допущение, что переходы между состояниями осуществляются под действием пуассоновских потоков. Тогда эти переходы можно аналитически описать экспоненциальным распределением. Следует отметить, что потоки переходов событий состояний сложной системы в большинстве случаев не будут простейшими. Следовательно, плотности вероятности перехода λ_{ij} являются интенсивностями соответствующих потоков событий, произвольным образом зависящими от времени [20].

Для корректного решения задач построения математических алгоритмов при возникновении мгновенных отказов АТ делается допущение, что на небольшом интервале времени Δt протекание процесса в многокомпонентных системах рассматривается как процесс с дискретными состояниями и дискретным временем, трансформация состояний системы происходит с шагом $t = 0, t = \Delta t, t = 2\Delta t, \dots$. Временной шаг задается при решении уравнений состояния системы ТО ВС и функциональных систем с использованием программного обеспечения работы ЭВМ [17].

Обозначим через a_{ij} интенсивности, а через p_{ij} соответственно вероятности перехода из одного состояния в другое. Интенсивность перехода a_{ij} характеризует, с какой скоростью осуществляется переход из одного состояния в другое в единицу времени, а вероятность



Рисунок 3 – Риски ОУЭ ВС, связанных с природными явлениями

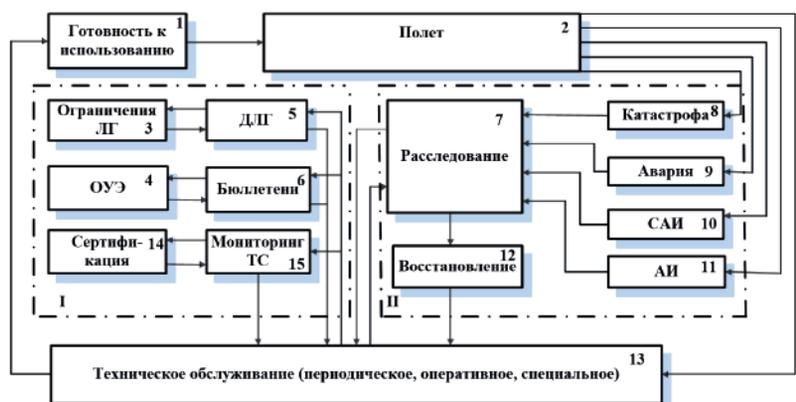


Рисунок 4 – Граф состояний СУБП разработчика (изготовителя):

I – блок формирования и поддержания летной годности (ПЛГ); II – блок безопасности полетов; ДЛГ – директивы летной годности; ЛГ – летная готовность; ОУЭ – ожидаемые условия эксплуатации; ТС – техническое состояние; САИ – серьезный авиационный инцидент; АИ – авиационный инцидент

перехода p_i – с какой вероятностью осуществляется переход из одного состояния в другое.

Общий вид дифференциальных уравнений Колмогорова для разрабатываемой модели СУБП в соответствии с рисунком 4 будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{dt} = a_{131} \cdot p_{131} \cdot P_{13} - a_{12} \cdot p_{12} \cdot P_1 \\ \vdots \\ \frac{dp_{12}}{dt} = a_{712} \cdot p_{712} \cdot P_7 - a_{1213} \cdot p_{1213} \cdot P_{12} \\ \frac{dp_{13}}{dt} = a_{213} \cdot p_{213} \cdot P_2 - a_{1013} \cdot p_{1013} \cdot P_{10} + a_{1113} \cdot p_{1113} \cdot P_{11} + \\ + a_{713} \cdot p_{713} \cdot P_7 + a_{313} \cdot p_{313} \cdot P_3 + a_{413} \cdot p_{413} \cdot P_4 + \\ + a_{613} \cdot p_{613} \cdot P_6 - a_{137} \cdot p_{137} \cdot P_{13} - a_{131} \cdot p_{131} \cdot P_{13} \\ \vdots \end{cases} \quad (5)$$

Основные расчетные зависимости, входящие в состав дифференциальных уравнений Колмогорова (5) для разрабатываемой модели СУБП представлены в таблице 2.

На основе проведенных исследований разработана программа расчета характеристик оценки эффективности процедур СУБП организаций разработчиков и изготовителей АТ в Visual Studio Code на языке C++ . Структурная схема программной единицы представлена на рисунке 5.

Заключение

В ходе исследования:

- выполнен анализ международной, отечественной научной и нормативной базы по вопросам поддержания летной годности ВС, БП и методам оценки рисков в организациях разработчиков и изготовителей АТ;
- выявлено, что одним из наиболее эффективных методов оценки текущего состояния БП и прогнозирования являются марковские процессы;
- разработан граф состояний БП организаций разработчиков и изготовителей АТ;
- разработана математическая модель СУБП организаций разработчиков и изготовителей на основе полумарковских процессов;
- разработана программа расчета характеристик оценки эффективности процедур СУБП организаций разработчиков и изготовителей АТ в Visual Studio Code на языке C++ .

Таким образом, на основе марковских процессов создана математическая модель и программа расчета характеристик оценки эффективности процедур обеспечения БП организаций разработчиков и изготовителей АТ, которая способна делать прогноз состояния системы БП, выявлять наименее надежные элементы.

Результаты исследования рекомендуется использовать разработчикам и изготовителям авиационной техники на этапах проектирования, производства и эксплуатации ВС.

Таблица 2 – Основные расчетные зависимости вероятностей и интенсивностей перехода

Вероятности перехода	Интенсивности перехода
$p_{28} = 10^{-9}$	$a_{28} = \frac{1}{t_{п}}$
$p_{29} = 10^{-7}$	$a_{29} = \frac{1}{t_{п}}$
$p_{28} = 10^{-5}$	$a_{210} = \frac{1}{t_{п}}$
$p_{28} = 10^{-3}$	$a_{211} = \frac{1}{t_{п}}$
$p_{213} = 1 - p_{28} - p_{29} - p_{210} - p_{211}$	$a_{213} = \frac{1}{t_{п}}$
$p_{131} = 1 - p_{25} - p_{26} - p_{27} - p_{215}$	$a_{131} = \frac{1}{t_{то}}$
$p_{135} = 1 - e^{-\omega t}$	$a_{135} = \frac{1}{t_{то}}$



Рисунок 5 – Блок-схема программы расчета характеристик системы безопасности полетов

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Приложение 6 к Конвенции о международной гражданской авиации. 1944 г. Эксплуатация воздушных судов. – Монреаль : ИКАО, 2022. – Ч. 1. – 150 с.
2. Приложение 8 к Конвенции о международной гражданской авиации 1944 г. Летная годность воздушных судов. – Монреаль : ИКАО, 2020. – 120 с.
3. Приложение 19 к Конвенции о международной гражданской авиации 1944 г. Управление безопасностью полетов. – Монреаль : ИКАО, 2013. – 110 с.
4. Правила расследования авиационных происшествий и инцидентов с гражданскими воздушными судами в Российской Федерации [Электронный ресурс]: Постановление Правительства РФ, 18.06.1998, № 609. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/12112014>. – Дата доступа: 10.09.2023.
5. Правила разработки и применения СУБП ВС, а также сбора и анализа данных о факторах опасности и риска, создающих угрозу БП гражданских ВС, хранения этих данных и обмена ими в соответствии с международными стандартами Международной организации гражданской авиации и признании утратившими силу некоторых актов Правительства РФ [Электронный ресурс]: Постановление Правительства РФ, 12.04.2022, № 642. – Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/404379316>. – Дата доступа: 10.09.2023.
6. Руководство по организации сбора, обработки и, использования полетной информации в авиапредприятиях гражданской авиации Российской Федерации [Электронный ресурс]: утв. Росавиацией 30.04.2020. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_358114/e116c68d7aa066465fbd9ff6b82dd8993715981. – Дата доступа: 10.09.2023.
7. Изделия авиационной техники безопасность полета, надежность, контролепригодность, эксплуатационная и ремонтная технологичность Номенклатура показателей: ГОСТ Р 56079 – 2014 [Электронный ресурс]. – Введен впервые; введ. 01.01.2015. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 15 с. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200112021>. – Дата доступа: 10.09.2023.
8. Воздушный транспорт. Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Термины и определения: ГОСТ Р 53863-2010 [Электронный ресурс]. – Введен впервые; введ. 01.07.2011. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 19 с. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200083233>. – Дата доступа: 10.09.2023.
9. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения: ГОСТ Р 27.102-2021 (IEC 60050-192:2015, NEQ) [Электронный ресурс]. – Введен впервые; введ. 01.01.2022. – Москва : Российский институт стандартизации, 2021. – 39 с. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200181141>. – Дата доступа: 10.09.2023.
10. Авиационная техника внешние воздействующие факторы. Номенклатура и характеристики: ГОСТ Р 58047-2017 [Электронный ресурс]. – Введен впервые; введ. 01.06.2018. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 90 с. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200158330>. – Дата доступа: 10.09.2023.
11. Воздушный транспорт Система менеджмента безопасности авиационной деятельности. База данных. Авиационные риски, возникающие при проектировании АТ: ГОСТ Р 57242-2016 [Электронный ресурс]. – Введен впервые; введ. 01.07.2017. – Москва : Стандартинформ, 2016. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200141455>. – Дата доступа: 10.09.2023.
12. Воздушный кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс]: 19.03.1997, № 60-ФЗ; принят Гос. Думой 19 февр. 1997 г.; одобр. Советом Федерации 5 марта 1997 г. в ред. Федер. закона от 04.08.2023 // КонсультантПлюс. Россия / ЗАО «Консультант Плюс». – М., 1997. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_13744/009711b4b9730b8597cfd79d7160a30bcae04d60. – Дата доступа: 05.10.2023.

13. Сертификация авиационной техники, организаций разработчиков и изготовителей. Часть 21: ФАП [Электронный ресурс]: утв. М-вом транспорта РФ Пр. от 17.06.2019, № 184. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/72701980/>. – Дата доступа: 05.10.2023.
14. Руководство по летной годности. Том II. Сертификация конструкции и сохранение летной годности, глава 9 «Аутентичность и работоспособность составных частей ВС»: Doc 9760 AN/967 [Электронный ресурс]. – Изд. 4-е. ИКАО, 2020. – Режим доступа: <https://mlgvs.ru/files/bib/doc9760.pdf>. – Дата доступа: 05.10.2023.
15. Руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП): Doc 9859 AN/474. – Изд. 3-е. – 2013. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://continent-online.com/Document/?doc_id=38502856. – Дата доступа: 05.10.2023.
16. Менеджмент риска. Технологии оценки риска: ГОСТ Р 58771-2019 [Электронный ресурс]. – Взамен ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011; введ. 01.03.2020. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 90 с. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200170253>. – Дата доступа: 05.10.2023.
17. Самуленков, Ю. И. Построение имитационной математической модели системы технического обслуживания воздушных судов / Ю. И. Самуленков, Я. А. Филатова, А. Д. Грузд // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2021. – Том 24. – № 4. – С. 38–49.
18. Советов, Б. Я. Моделирование систем : учебник для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 2001. – 343 с.
19. Вентцель, Е. С. Исследование операций / Е. С. Вентцель. – М. : Советское радио, 1972. – 552 с.
20. Емелин, Н. М. Обработка систем технического обслуживания летательных аппаратов / Н. М. Емелин. – М. : Машиностроение, 1995. – 128 с.

REFERENCES

1. Prilozhenie 6 k Konvencii o mezhdunarodnoj grazhdanskoj aviacii. Eksploataciya vozdušnyh sudov CHast' 1. [Annex 6 to the Convention on International Civil Aviation. Aircraft operation Part 1]. Ed. 12th. ICAO, 2022.
2. Prilozhenie 8 k Konvencii o mezhdunarodnoj grazhdanskoj aviacii LG vozdušnyh sudov. [Annex 8 to the Convention on International Civil Aviation of LG Aircraft]. Ed. 4th. ICAO, 2020.
3. Prilozhenie 19 k Konvencii o mezhdunarodnoj grazhdanskoj aviacii Upravlenie bezopasnost'yu poletov [Annex 19 to the Convention on International Civil Aviation Safety Management]. Ed. 1st. ICAO, 2013.
4. Pravila rassledovaniya aviacionnyh proisshestvij i incidentov s grazhdanskimi vozdušnymi sudami v Rossijskoj Federacii: Postanovlenie Pravitel'stva RF: 18.06.1998, No 609 [On Approval of the Rules for the Investigation of Aviation Accidents and Incidents with Civil Aircraft in the Russian Federation: The Government of the Russian Federation Resolution: 18.06.1998, No 609], available at: <https://base.garant.ru/12112014> (accessed 10.09.2023).
5. Pravila razrabotki i primeneniya SUBP VS, a takzhe sbora i analiza dannyh o faktorah opasnosti i riska, sozdayushchih ugrozu BP grazhdanskih VS, hraneniya etih dannyh i obmena imi v sootvetstvii s mezhdunarodnymi standartami Mezhdunarodnoj organizacii grazhdanskoj aviacii i priznanii utrativshimi silu nekotoryh aktov Pravitel'stva RF: Postanovlenie Pravitel'stva RF: 12.04.2022, No 642 [Rules for the Development and Application of the SMS of the Armed Forces, as Well as the Collection and Analysis of Data on Hazard and Risk Factors that Pose a Threat to the UAV of Civil Aircraft, the Storage and Exchange of This Data in Accordance with International Standards of the International Civil Aviation Organization and the Invalidation of Certain acts of the Government of the Russian Federation: Decree of the Government of the Russian Federation: 12.04.2022, No. 642], available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/404379316> (accessed 10.09.2023).
6. Rukovodstvo po organizacii sbora, obrabotki i, ispol'zovaniya poletnoj informacii v aviapredpriyatijah grazhdanskoj aviacii Rossijskoj Federacii: utv. Rosaviaciej 30.04.2020. [Guidelines for organizing the collection, processing and use of flight information in civil aviation enterprises of the Russian Federation [Electronic resource]: approved. Rosaviaciation 04.30.2020], available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_358114/e116c68d7aa066465fbd9ff6b82dd8993715981 (accessed 10.09.2023).
7. Izdeliya aviacionnoj tekhniki bezopasnost' poleta, nadezhnost', kontroleprigodnost', eksploatacionnaya i remontnaya tekhnologichnost' Nomenklatura pokazatelej: GOST R 56079 2014 [Aircraft products flight safety, reliability, controllability, operational and repair manufacturability Nomenclature of indicators: GOST R 56079 2014], Izdanie oficial'noe. Moskva, Rossijskij institut standartizacii 2019, 15 p., available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200112021> (accessed 10.09.2023).
8. Vozdušnyj transport. Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta aviacionnoj tekhniki. Terminy i opredeleniya: GOSTR 53863- 2010 [Air transport. The system of maintenance and repair of aviation equipment. Terms and definitions: GOSTR 53863-2010], Izdanie oficial'noe. Moskva, Rossijskij institut standartizacii 2020, 19 p., available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200083233> (accessed 10.09.2023).
9. Nadezhnost' v tekhnike. Nadezhnost' ob'ekta. Terminy i opredeleniya. (IEC 60050-192:2015, NEQ): GOSTR 27.102 - 2021 [Reliability in technology. Reliability of the object. Terms and definitions: GOSTR 27.102 2021 (IEC 60050-192:2015, NEQ)] Izdanie oficial'noe. Moskva: Rossijskij institut standartizacii 2021, 39 p., available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200181141> (accessed 10.09.2023).
10. Aviacionnaya tekhnika vneshnie vozdeystviyushchie faktory. Nomenklatura i harakteristiki: GOSTR 58047 - 2017 [Aviation technology external influencing factors. Nomenclature and characteristics: GOSTR 58047 2017] Izdanie oficial'noe. Moskva: Standartinform, 2019, 90 p., available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200158330> (accessed 10.09.2023).
11. Vozdušnyj transport Sistema menedzhmenta bezopasnosti aviacionnoj deyatel'nosti. Baza dannyh. Aviacionnye riski, voznikayushchie pri proektirovanii AT: GOSTR 57242-2016. [Air transport Aviation safety management system. Database. Aviation risks arising during the design of AT: GOSTR 57242 2016.] Izdanie oficial'noe Moskva Standartinform, 2016, available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200141455> (accessed 10.09.2023).
12. Vozdušnyj kodeks Rossijskoj Federacii: 19.03.1997, № 60-FZ: prinjat Gos. Dumoj 19 fevr. 1997 g.; odobr. Sovetom Federacii 5 marta 1997 g. v red Feder. zakona ot 04.08.2023 [Air Code of the Russian Federation: 03.19.1997, No. 60-FZ: adopted by the State. Duma 19 Feb. 1997: approved. by the Federation Council on March 5, 1997, as edited by the Federation. Law of 08.04.2023]. ConsultantPlus. Russia, Moscow, 1997, available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_13744/009711b4b9730b8597cfd79d7160a30bcae04d60 (accessed 10.05.2023).
13. Sertifikaciya aviacionnoj tekhniki, organizacij razrabotchikov i izgotovitelej. CHast' 21: FAP: utverzhdeno Ministerstvom transporta Rossijskoj Federacii, Prikaz ot 17.06.2019 [Certification of aviation equipment, Developer organizations and manufacturers. Part 21: FAP], available at: <https://base.garant.ru/72701980/> (accessed 10.05.2023).
14. Rukovodstvo po letnoj godnosti. Tom II. Sertifikaciya konstrukcii i sohranenie letnoj godnosti, glava 9 «Autentichnost' i rabotosposobnost' sostavnyh chastej VS». Doc 9760 AN/967 [Airworthiness Manual. Volume II. Certification of the design and preservation of airworthiness, Chapter 9 "Authenticity and operability of the components of the aircraft". Doc 9760 AN/967]. Ed. 4th. ICAO, 2020, available at: <https://mlgvs.ru/files/bib/doc9760.pdf> (accessed 10.05.2023).
15. Rukovodstvo po upravleniyu bezopasnost'yu poletov (RUBP). Doc 9859 AN/474. [Safety Management Manual (RUBP). Doc 9859 AN/474.]. Third edition 2013, available at: https://continent-online.com/Document/?doc_id=38502856 (accessed 10.05.2023).
16. Menedzhment riska. Tehnologii ocenki riska: GOST R 58771-2019. – Vzamen GOST R ISO/МЭК 31010-2011; vved. 01.03.2020 [Risk management. Risk assessment technologies: GOST R 58771-2019. – Instead of GOST R ISO/IEC 31010-2011; entered 03/01/2020.] Moscow, Standartinform, 2020, 90 p., available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200170253> (accessed 10.05.2023).
17. Samuленков Ю. И., Filatova Ya. A., Gruzd A.D. Postroenie imitacionnoj matematicheskoj modeli sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya vozdušnyh sudov [Construction of a simulation mathematical model of an aircraft maintenance system] Nauchnyj Vestnik MGTU GA, 2021. Vol. 24, no. 4. pp. 38-49.
18. Советов В.Я., Yakovlev S.A. Modelirovanie sistem: uchebnik dlya vuzov [Modeling of systems: textbook for universities]. ed. 3, Moscow: Higher School, 2001, 343 p.
19. Wentzel E.S. Issledovanie operacij [Operations research]. Moscow: Soviet Radio, 1972, 552 p.
20. Emelin N.M. Otrabotka sistem tekhnicheskogo obsluzhivaniya letatel'nyh apparatov. [Development of aircraft maintenance systems.]. Moscow, Mashinostroenie, 1995, 128 p.

*Статья поступила в редакцию
15.11.2023*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОПАТКИ ГТД ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СИСТЕМЕ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ

MODELING OF A GTE BLADE FOR USE IN A CATALYTIC EXHAUST GAS CLEANING SYSTEM

Шегидевич Артём Артурович – кандидат технических наук, ректор учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
academy@bsaa.by

Шапорова Елена Анатольевна – кандидат химических наук, заведующий аспирантурой учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
shaporova.e@bgaa.by

Стойко Сергей Олегович – магистр технических наук, научный сотрудник научно-технического отдела учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
sergey_14_95@mail.ru

Котович Виталий Алексеевич – инженер-конструктор ООО «ЕСД-Солюшенс», Республика Беларусь
vitkots@mail.ru

Artem Shegidevich – Candidate of Technical Sciences, Rector of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
academy@bsaa.by

Elena Shapороva – Candidate of Chemical Sciences, Head of Postgraduate Studies of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
shapороva.e@bgaa.by

Sergey Stoiko – Master of Technical Sciences, Researcher of the Research Laboratory of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
sergey_14_95@mail.ru

Vitaly Kotovich – Design Engineer at ESD-Solutions LLC, Republic of Belarus
vitkots@mail.ru

Аннотация: в ходе работы газотурбинных двигателей выделяются вредные вещества, способствующие загрязнению атмосферы, в связи с чем требования к экологическим характеристикам авиационной техники возрастают. Одним из наиболее эффективных способов снижения уровня загрязнений в выхлопных газах представляется их каталитическая очистка. Одними из наиболее перспективных катализаторов представляются шпинельные структуры на основе ряда 3d-металлов, активные в окислительно-восстановительных превращениях смеси CO и NO_x. В настоящей работе изучены гидроксиднооксидные системы, содержащие ионы Al, Cr, Cu, Zn. На основании результатов их исследований методами ИК-спектроскопии, дифференциально-термического, рентгенофазового и химического анализов, показано, что в них образуются шпинели типа M(III)2M(II)O₄, характеризующиеся значительным количеством кислотно-основных активных центров. Для обеспечения эффективности очистки отходящих газов была увеличена площадь поверхности их контакта с катализатором за счет изменения структуры лопаток без изменения формы. Проведены исследования аэродинамики полученной поверхности лопатки, на основании чего показана возможность ее применения в газоздушном тракте газотурбинного двигателя. Полученные в работе данные могут быть полезны при разработке газотурбинных двигателей, удовлетворяющих современным экологическим требованиям.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, каталитические системы очистки отходящих газов, шпинельные структуры, моделирование лопатки, аэродинамические характеристики.

Abstract: during the operation of gas turbine engines, harmful substances are released that contribute to air pollution, and therefore the requirements for the environmental characteristics of aircraft are increasing. One of the most promising catalysts seems to be spinel structures based on a number of 3d metals, active in the redox transformations of a mixture of CO and NO_x. In this work, hydroxide oxide systems containing Al, Cr, Cu, and Zn ions were studied. Based on the results of their studies using IR spectroscopy, differential thermal, X-ray phase and chemical analyses, it is shown that spinels of the M(III)2M(II)O₄ type are formed in them, characterized by a significant number of acid-base active centers. To ensure efficient cleaning of exhaust gases, the surface area of their contact with the catalyst was increased by changing the structure of the blades without changing the shape. Studies have been carried out on the aerodynamics of the resulting blade surface, on the basis of which the possibility of its use in the gas-air duct of a gas turbine engine has been shown. The data obtained in the work can be useful in the development of gas turbine engines that meet modern environmental requirements.

Keywords: gas turbine engine, catalytic exhaust gas purification systems, spinel structures, blade modeling, aerodynamic characteristics.

Введение

Авиационный транспорт представляет собой один из основных источников загрязнения верхних слоев атмосферы. В результате работы газотурбинных двигателей (ГТД) при неполном сгорании топлива, диссоциации CO₂, из-за ряда конструктивных факторов выделяются такие загрязнители, как окиси азота (NO_x), оксиды углерода (CO), углеводороды различного состава (C_xH_y), дым (SN) [1]. Требования ИКАО к экологическим характеристикам авиационных двигателей возрастают с каждым годом [2]. В связи с этим при проектировании новых двигателей, совершенствовании эксплуатации уже существующих учитывается необходимость минимизации вреда окружающей среде. Современные представления в решении этой проблемы развиваются в нескольких направлениях: использование биотоплива, модернизация конструктивных схем камер сгорания ГТД [1, 3], использование катализаторов окисления и восстановления вредных веществ [4, 5].

Каталитический способ уменьшения токсичности выхлопных газов представляется одним из наиболее перспективных. Анализ литературных данных [1, 4, 5] и наши исследования [6] показали, что хорошими каталитическими свойствами обладают шпинели на основе ряда 3d-металлов, имеющие активные центры на поверхности в широкой области pH и сохраняющие свои качества при высоких температурах.

При нанесении слоя катализатора на поверхность лопаток турбины выхлопные газы ГТД, контактируя с материалом, будут очищаться за счет протекания реакций восстановления и окисления вредных компонентов на поверхности катализатора. Для повышения эффективности этих процессов необходимо максимально увеличить время контакта газа с катализатором.

Целью настоящей работы является выбор каталитической системы и разработка профиля лопатки, способной обеспечить высокую эффективность каталитического способа очистки выхлопных газов ГТД.

Обоснование выбора каталитической системы металлов

К катализаторам очистки газов предъявляются весьма жесткие требования: высокая активность и избирательность каталитического действия, термостабильность, устойчивость к действию ядов, высокая механическая прочность, большая теплопроводность. Данные требования в случае ГТД обусловлены температурами более 1000 °С и низким временем контакта очищаемого газа с катализатором в силу высокой скорости потока. Помимо этого катализаторы должны быть потенциально безопасными как при производстве, так и при эксплуатации. Одним из важных моментов является получение развитой пористой структуры и значительной величины удельной поверхности. В настоящее время все большее распространение получают монокристаллические каталитические системы, содержащие активные металлы на различных носителях. В качестве активного компонента используют один или несколько металлов: Mn, Fe, Cr, V, Mo, Co, Ce, Ni, W, Cu, Sn, Au, Pt, Pd, Rh и Ir. Существующие методы каталитической очистки газовых выбросов от

оксидов азота основаны на восстановлении NO_x такими соединениями, как аммиак, углеводороды, монооксид углерода и др. При этом для практического использования в этом процессе пригодны только те катализаторы, которые сохраняют свою активность в присутствии кислорода, являющегося конкурентом NO_x при взаимодействии с оксидом углерода. В то же время, некоторые катализаторы способствуют конверсии CO в присутствии кислорода [6].

Одними из наиболее перспективных являются каталитические системы, содержащие в качестве основных компонентов следующие металлы: Ni, Zn, Co, Al, Fe и др. При их совместном присутствии на поверхности носителя при температуре 400 – 600 °С формируются соединения шпинельной структуры, активные в окислительно-восстановительных превращениях смеси CO и NO_x [4, 5].

Нами были изучены системы, содержащие ионы Cr, Zn, Sc, в которых при определенных соотношениях формируется шпинель. Это подтверждают результаты, полученные с помощью ИК-спектроскопии, дифференциально-термического, рентгенофазового и химического анализов гидроксидно-оксидных систем Cr(III)-Zn(II), Fe(III)-Cu(II), Fe(III)-Ni(II), представленные в работах [6 – 8].

Исследования кислотно-основных свойств поверхности оксида хрома(III), показали, что наибольший вклад вносят основные центры Льюиса, присутствуют также различные по кислотности центры Бренстеда (рисунок 1).

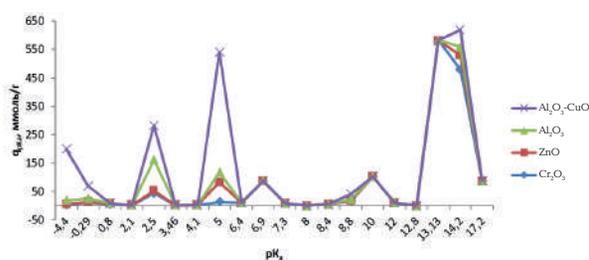
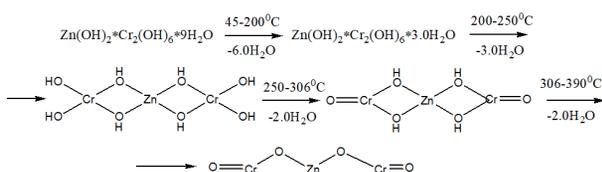


Рисунок 1 – Распределение кислотно-основных центров на поверхности Cr₂O₃, ZnO [6], Al₂O₃ [9], Al₂O₃-CuO [9]

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что распределение активных центров носит немонокристаллический и неоднородный характер. Это проявляется в дискретности и достаточно четкой дифференциации полос адсорбции с максимумами разной интенсивности, отвечающими определенному значению pKa. Льюисовских основных центров, соответствующих атомам кислорода, выходящим на поверхность частиц оксида хрома(III), сравнительно немного (pKa ~ 0). Льюисовских кислотных центров – атомов металла, выходящих на поверхность, преимущественное большинство в анализируемом образце (pKa ~ 14). Присутствуют также Бренстедовские центры, формирующиеся на поверхности твердой фазы, а именно, на атомах металла кристаллической решетки оксида, в результате гидратации Льюисовских кислотных центров: это кислотные центры в виде OH^{δ+}-групп с частичным положительным зарядом на атоме водорода, нейтральные центры в виде OH-групп, и основные в виде O^{δ-}-групп с частичным отрицательным зарядом на атоме кислорода гидроксогруппы. Их примерно одинаковое количество. Исследования [9] кислотно-основных свойств поверхности оксида цинка указывают на аналогичное распределение кислотных и основных центров Льюиса и Бренстеда,

что свидетельствует о близкой структуре поверхности оксидов Cr_2O_3 и ZnO .

Сравнительный анализ структурных особенностей оксидов хрома, цинка и двойных систем проведен по результатам их рентгенофазового и термогравиметрического анализа соответствующих гидроксидов [6, 7]. Показано, что оксиды, получаемые осаждением из растворов и последующим термолизом, обладают пористой структурой с достаточно высокой степенью кристалличности и наличием ряда кислотных и основных центров на поверхности. Кроме того, сравнение кривых распределения кислотно-основных центров Al_2O_3 и в шпинельной фазе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CuO}$ свидетельствует о значительном увеличении активных центров в двойной системе, что обусловлено, на наш взгляд, формированием шпинельной структуры в следующей последовательности:



Для того, чтобы использование катализатора не оказывало негативного влияния на течение газов в ГТД целесообразно наносить его на лопатки рабочих колес турбины и сопловые аппараты. По температуре эксплуатации шпинельные структуры на основе хрома характеризуются увеличением каталитической активности при температуре равной 900–950 °С; шпинели на основе алюминия выдерживают температуры приблизительно до 2000 °С. Температуры газов, проходящих лопатки турбины достигают 1500 °С, следовательно, в качестве катализатора, нанесенного на лопатки целесообразно использовать шпинели на основе алюминия, хромосодержащие катализаторы применимы в большей степени на менее нагреваемых поверхностях соплового аппарата.

Моделирование профиля лопатки турбины

Необходимым фактором для повышения эффективности каталитической системы является достаточное время взаимодействия очищаемого газа с активной поверхностью. Возможные способы увеличения времени контакта выхлопных газов с катализатором могут быть связаны с изменением площади лопаток за счет изменения их структуры или без изменения формы за счет создания большого числа отверстий, внутренних перегородок, штырьков, ребер. Подобные конструкции лопаток турбины ГТД используются для обеспечения более эффективного их охлаждения [10]. Для качественной и количественной оценки применения подобных лопаток в газоздушном тракте ГТД требуется проведение аэродинамических исследований.

Для моделирования использовалась геометрия профиля лопатки первой ступени турбины авиадвигателя CFM-56, в связи с распростра-

ненностью этой модели. Лопатка была воссоздана в программе Autodesk Inventor (№79EH1-L479) (рисунок 2, а).

Хорда лопатки, как и ее высота, равна 70 мм. Лопатка имеет небольшую геометрическую закрутку (максимальная кривизна – 15 %) для обеспечения эффективной работы в режиме безотрывного обтекания профиля набегающим потоком воздуха, т. к. в соответствии с законом изменения скоростей, чем дальше от центра вращения, тем больше линейная скорость при одной и той же угловой частоте вращения ротора.

Газодинамический анализ осуществлялся в программе Autodesk CFD. Начальные условия: статическое давление – 650 кПа; скорость набегающего потока – 450 м/с. Температура газа оказывает незначительное влияние на параметры обтекания лопатки, поэтому ее влиянием было решено пренебречь. При максимальной скорости набегающего потока газа, равной 667 м/с (рисунок 2, б), максимальное давление заторможенного потока равно 8,6 атмосфер и сосредоточено на передней кромке лопатки. Давление на внутренней поверхности составляет от 7 до 8,2 атмосфер.

Подъемная сила составляет 403 Н, сила лобового сопротивления – 300 Н. Общая площадь поверхности равна 54 см². Далее эти значения приняты в качестве эталонных.

Для повышения эффективности очистки, на наружной поверхности лопатки были размещены отверстия и выполнен внутренний канал, через который будет проходить часть воздуха. Изучение распределения давления набегающего потока на поверхность лопатки и ее обтекания этим потоком показало, что наибольший объем протекающего газа стремится к области ниже центра приложения динамической нагрузки. Здесь было сконцентрировано наибольшее количество отверстий, ведущих в канал на внутреннюю поверхность в районе задней кромки. Верхние отверстия расположены таким образом, чтобы улавливать перетекающие потоки газа (рисунок 3). Результаты моделирования (рисунок 4) свидетельствуют о том, что часть газа всасывается в отверстия и идет по каналу со скоростью на порядок меньшей. Модифицированная лопатка имеет площадь контакта на 80 % больше, по сравнению с исходной моделью, что обеспечит необходимые условия контакта. Повы-

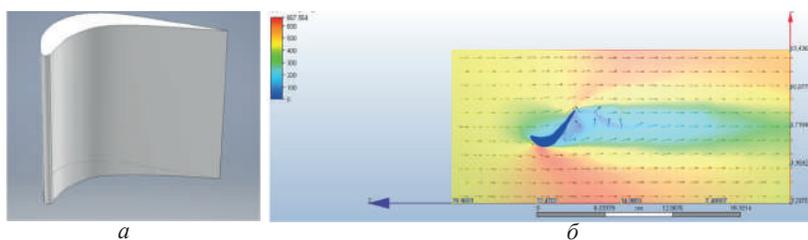


Рисунок 2 – Исходная модель лопатки первой ступени турбины CFM-56: а – 3D-модель, б – обтекание лопатки потоком газа в КП Autodesk CFD

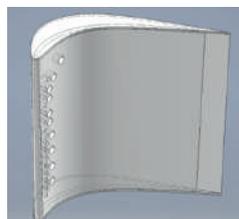


Рисунок 3 – Модифицированная лопатка

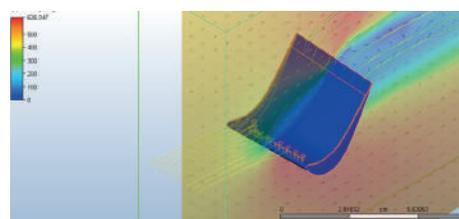


Рисунок 4 – Обтекание измененной лопатки потоком газа

шение времени взаимодействия вредных веществ, содержащихся в отходящих газах, с катализатором, нанесенным на поверхность лопаток, позволит повысить степень нейтрализации загрязнителей.

В таблице представлено сравнение характеристик исходной и модернизированной лопаток. Наличие отверстий не приводит к недопустимым нарушениям в работе модернизированных лопаток по сравнению с исходными: значения осевой и радиальной силы изменяются незначительно (5–6 %).

Заключение

Представленная модернизированная лопатка обеспечит высокую эффективность в каталитических си-

Таблица – Сравнение рабочих характеристик лопаток

Лопатка \ Параметр	Площадь, см ²	Подъемная сила (радиальная сила), Н	Сила лобового сопротивления (осевая сила), Н
Исходная	54	403	299
Модернизированная	97	382	281

стемах очистки выхлопных газов ГТД с минимальным воздействием на условия протекания газового потока. Полученные в работе данные могут быть полезны при разработке лопаток турбины ГТД, обеспечивающего снижение экологической нагрузки на атмосферу. Дальнейшее развитие работы требует прочностного расчета модернизированной лопатки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Комаров, Е. М. Методы уменьшения эмиссии вредных веществ в камерах сгорания ГТД и ГТУ / Е. М. Комаров // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2018. – № 5. – С. 9–29.
2. Doc 10031. Инструктивный материал по экологической оценке предлагаемых эксплуатационных изменений в сфере организации воздушного движения. 2014. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.icao.int/publications/Documents/10031_ru.pdf. – Дата доступа: 25.09.2023.
3. Харлина, Е. В. Малоэмиссионные камеры сгорания и способы охлаждения / Е. В. Харлина. – Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 70. – С. 29–39.
4. Гапонов, В. Л. Современные методы снижения вредных выбросов с отработавшими газами автотранспорта [Электронный ресурс] / В. Л. Гапонов, [и др.] // Технологии техносферной безопасности. – 2008. – Вып. 6. – С. 1–11. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2008-6/08-06-08.ttb.pdf>. – Дата доступа: 25.09.2023.
5. Кузьмина, Р. И. Каталитическая очистка газовых выбросов от оксидов азота и углерода / Р. И. Кузьмина, В. П. Севостьянов // Росс. хим. журн. – 2000. – Т. 44, №1. – С. 71–77.
6. Шапорова, Е. А. Кислотно-основные свойства поверхности оксида хрома (III) / Е. А. Шапорова [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2021. – Т. 57, No 3. – С. 270–277.
7. Термолит совместно осажденных гидроксидов хрома(III)-цинка(II) / Е. А. Телушенко, А. М. Кириллов, М. Н. Копылович, А. К. Баев // Журн. неорг. химии. – 2003. – Т. 48. № 9. – С. 305–312.
8. Термолит совместно осажденных гидроксидов хрома(III)-скандия(III) / Е. А. Телушенко [и др.] // Журн. неорг. химии. – 2004. – Т. 49, № 2. – С. 309–315.
9. Исследование влияния кислотно-основных свойств поверхности оксидов ZnO, Fe₂O₃ и ZnFe₂O₄ на их газочувствительность по отношению к парам этанола / С. С. Карпова [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47, вып. 8. – С. 1022–1026.
10. Магеррамова, Л. А. Конструктивные мероприятия, направленные на увеличение расчетной долговечности лопаток высокотемпературных турбин / Л. А. Магеррамова // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19, № 2(68). – С. 79–86.

REFERENCES

1. Komarov E.M. Metody umen'sheniya jemissii vrednyh veshhstv v kamerah sgoranija GTD i GTU [Methods for reducing the emission of harmful substances in the combustion chambers of gas turbine engines and gas turbine engines]. Mashinostroenie i komp'yuternye tehnologii, 2018, no. 5, pp. 9-29.
2. Doc 10031. Guidance material on environmental assessment of proposed operational changes in air traffic management, 2014, available at: https://www.icao.int/publications/Documents/10031_ru.pdf. (accessed 09.25.2023).
3. Harlina E.V. Malojemissionnye kamery sgoranija i sposoby ohlazhdenija [Low-emission combustion chambers and cooling methods]. Vestnik permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Ajerokosmicheskaja tehnika, 2022, no. 70, pp. 29-39.
4. Garonov V.L., Badaljan L.H., Kurdjukov V.N., Kurenkova T.N. Sovremennye metody snizhenija vrednyh vybrosov s otrabotavshimi gazami avtotransporta [Modern methods for reducing harmful emissions from vehicle exhaust gases]. Tehnologii tehnosfernoj bezopasnosti, 2008, issue. 6, pp. 1-11, available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2008-6/08-06-08.ttb.pdf> (accessed 09.25.2023).
5. Kuz'mina R.I., Sevost'janov V.P. Kataliticheskaja ochestka gazovyh vybrosov ot oksidov azota i ugljeroda [Catalytic purification of gas emissions from nitrogen and carbon oxides]. Rossijskij himicheskij zhurnal, 2000, vol. 44, no. 1, pp. 71-77.
6. Shaporova E. A., Zhukova A. A., Baev A. K., Sidorenko A. Ju. Kislотно-osnovnyye svojstva poverhnosti oksida hroma(III) [Acid-base properties of the surface of chromium(III) oxide]. Vesci Nacyanal'naj akademii navuk Belarusi. Serya himichnyh navuk, 2021, vol. 57, no. 3, pp. 270-277. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-3-270-277>.
7. Telushhenko E.A., Kirillov A.M., Kopylovich M.N., Baev A.K. Termoliz sovместno osazhdennyh gidroksidov hroma(III)-cinka(II) [Thermolysis of co-precipitated chromium(III)-zinc(II) hydroxides]. Russian Journal of Inorganic Chemistry, 2003, vol. 48, no. 9, pp. 305-312.
8. Telushhenko E.A., Kirillov A.M., Kopylovich M.N., Baev A.K. Termoliz sovместno osazhdennyh gidroksidov hroma(III)-skandija(III) [Thermolysis of co-precipitated chromium(III)-scandium(III) hydroxides]. Russian Journal of Inorganic Chemistry, 2004, vol. 49, no. 2, pp. 309-315.
9. Karpova S.S., Moshnikov V.A., Maximov A.I., Myakin S.V., Kazanceva N.E. Issledovanie vliyaniya kislотно-osnovnyh svoystv poverhnosti oxidov ZnO, Fe₂O₃ i ZnFe₂O₄ na ih gazochuvstvitel'nost' po otnosheniyu k param etanola [Investigation of the influence of acid-base properties of the surface of oxides ZnO, Fe₂O₃ and ZnFe₂O₄ on their gas sensitivity with respect to ethanol vapors]. Phizika i tehnika poluprovodnikov, 2013, Vol. 47 (8), pp. 1022-1026.
10. Magerramova L. A. Konstruktivnyye meropriyatija, napravlennyye na uvelichenie raschetnoj dolgovechnosti lopatok vysokotemperaturnykh turbin [Constructive measures aimed at increasing the design durability of high-temperature turbine blades]. 2015, vol. 19, no. 2(68), pp. 79-86.

Статья поступила в редакцию
18.11.2023



ЮРИДИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 656.1

С. С. ЧИБУХЧЯН, О. С. ЧИБУХЧЯН, Н. Г. МНАЦАКАНЯН, К. М. ИГИТЯН

S. CHIBUKHCHYAN, H. CHIBUKHCHYAN, N. MNATSAKANYAN, K. IGITYAN

ВОЗДУШНЫЙ ТРАНСПОРТ В ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

AIR TRANSPORT IN THE TRANSPORT SYSTEM OF THE REPUBLIC OF ARMENIA

Чибухчян Сурен Смилович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой транспортных средств Национального политехнического университета Армении, Республика Армения
armenpack@mail.ru

Suren Chibukhchyan – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Vehicles of the National Polytechnic University of Armenia, Republic of Armenia
armenpack@mail.ru

Чибухчян Оганес Суренович – кандидат технических наук, директор Инновационных услуг Национального политехнического университета Армении, Республика Армения
hovhannesch@gmail.com

Hovhannes Chibukhchyan – Candidate of Technical Sciences, Head of Innovation services, National Polytechnic University of Armenia, Republic of Armenia
hovhannesch@gmail.com

Мнацаканян Нарине Гагиковна – кандидат экономических наук, доцент кафедры инженерной экономики, Национального политехнического университета Армении, Республика Армения
narinemn9@mail.ru

Narine Mnatsakanyan – Candidate of Economical Sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Economics, National Polytechnic University of Armenia, Republic of Armenia
narinemn9@mail.ru

Игитян Карен Мартинович – преподаватель кафедры транспортных средств, Национальный политехнический университет Армении, Республика Армения
kigityan85@mail.ru

Karen Igityan – Lecturer at the Department of Vehicles of the National Polytechnic University of Armenia, Republic of Armenia
kigityan85@mail.ru

Аннотация: в работе представлены положения Национальной стратегии обеспечения транспортной безопасности Республики Армения, анализ состояния, основные показатели, пути развития воздушного транспорта в контексте развития транспортного комплекса Евразийского экономического Союза, принципы поэтапного формирования общего рынка транспортных услуг. Рассмотрены вопросы реализации совместных образовательных программ, подготовки кадров и развития научно-технического сотрудничества, между университетами в области воздушного транспорта.

Ключевые слова: воздушный транспорт, логистика, транспортные инфраструктуры, Армения, кадры.

Abstract: the paper presents the provisions of the National Strategy for Ensuring Transport Security of the Republic of Armenia, the analysis of the state, the main indicators, the ways of developing air transport in the context of the development of the transport complex of the Eurasian Economic Union, the principles of the gradual formation of a common market for transport services. The issues of implementation of joint educational programs, training of personnel and development of scientific and technical cooperation between universities in the field of air transport were considered.

Keywords: air transport, logistics, transport infrastructures, Armenia, personnel.

Введение

Согласно данным Всемирного банка, международный транспортный рынок оценивается более чем в 2,2 трлн долл. США (порядка 7 % мирового ВВП) [1]. Международная ассоциация воздушного транспорта в феврале 2023 г. объявила о достижении глобальными авиаперевозками в 2022 году 68,5 % от уровня, зафиксированного до пандемии Covid-19.

Объем мировых пассажирских авиаперевозок в 2022 году увеличился на 64,4 % к 2021 году, рост

в декабре 2022 года к декабрю 2021 года составил 39,7 % – сообщается в пресс-релизе Международной ассоциации воздушного транспорта (IATA). Согласно данным IATA, самый сильный рост к 2021 году был зафиксирован на Ближнем Востоке (144,4 %) и в странах Европы (100,2 %). В странах Африки увеличение составило 84,9 %, Азиатско-Тихоокеанского региона – 34 %, Латинской Америки – 62,7 %, Северной Америки – 45,5 % [2].

В целом стабильно функционирующая транспортная система, бесперебойные поставки товаров и услуг,

а также ряд других экономически важных факторов при их комплексном рассмотрении в итоге приводят к повышению уровня не только в транспортной, но и экономической безопасности государства.

Транспортная безопасность традиционно рассматривается в качестве системообразующего компонента национальной безопасности любого государства [3] и для Армении представляется особенно актуальной.

Это связано с тем, что Армения — не имеющая выхода к морю страна, расположенная на Южном Кавказе, граничащая с Азербайджаном, Грузией, Исламской Республикой Иран и Турцией, имеет особое геополитическое положение и значение в Южном Кавказе.

Продолжающаяся более 30 лет транспортная блокада Армении, отсутствие возможности прямого участия в международных транспортных коридорах (например, транспортный коридор «Европа — Кавказ — Азия» (TRASECA), «Север — Юг» или «Один пояс — Один путь») в итоге делают страну более уязвимой, т.к. это препятствует полноценному развитию внутренних транспортных инфраструктур в соответствии с международными нормами.

Сохранение единства государственного организма возможно лишь тогда, когда развитие транспортной системы опережает экономическое развитие регионов [4].

Воздушное сообщение позволяет участвовать в мировой экономике практически любой стране и региону, открывая доступ на международные рынки товаров и услуг и содействуя глобализации производственных и сбытовых цепочек.

В 2019 г. 35 % стоимости всего оборота международной торговли приходилось на воздушный транспорт — было перевезено почти 61 млн тонн грузов общей стоимостью 6,5 трлн долл. США [5].

Ожидается, что пассажирские авиаперевозки в мире к 2024 году достигнут 4 млрд чел. и превысят уровень допандемийного 2019 года. Общий пассажиропоток в 2021 г. составил 47 % от уровня 2019 г. IATA прогнозирует, что этот показатель в 2023 г. составит 94 %, в 2024 г. — 103 %, в 2025 г. — 111 % [6].

Транспортный сектор Республики Армения

Развитие транспортной системы Армении имеет непосредственное социально-экономическое, экологическое значение не только для Армении, но и для развития и стабильности региона в целом.

В Национальной стратегии обеспечения транспортной безопасности Республики Армения в качестве главных внешних угроз выделяются:

- транспортная блокада Армении со стороны Азербайджана и Турции;
- недобросовестная конкуренция со стороны зарубежных перевозочных компаний;
- игнорирование интересов армянских перевозчиков на международных рынках;
- использование армянскими грузоперевозчиками на международных рынках транспортных средств, не соответствующих европейским стандартам;
- полная зависимость транспортной системы страны от импортируемого жидкого и газового топлива [7].

Основные виды транспорта Республики Армения (РА) для пассажиро- и грузоперевозок — автомо-

бильный, воздушный, железнодорожный, морской, трубопроводный (для транспортировки энергоносителей).

Морские коммуникации в основном обеспечивают участие Армении в международных транспортных коридорах и, в частности, в TRASECA, хотя и имеют косвенный характер, т.к. осуществляются исключительно через Грузию [8, 9]. Тем не менее, Армения осуществляет морские импортно-экспортные операции с внешним миром преимущественно через следующие паромные переправы:

1. Ильичевск — Поты — Батуми (входит в TRASECA).
2. Керчь — Батуми.
3. Поты — Кавказ.
4. Поты — Новороссийск — Бургас.
5. Констанца — Поты.

Основные грузопотоки Армении в плане международных коммуникаций осуществляются транзитом через территорию Грузии по железной дороге, либо автотранспортом и далее морским транспортом через порты Поты и Батуми в страны Европы, Азии и Америки. Также значительная часть грузов идет по железной дороге через Грузию в порты с дальнейшей отправкой железнодорожными паромными в порты Черного моря.

Очевидно, что географическое положение РА (отсутствие выхода к морю, территориальные ограничения) обуславливает стратегическую важность воздушного транспортного сектора. Воздушное сообщение представляет также особую актуальность для перевозки скоропортящихся и дорогостоящих товаров из Армении, для развития деловых поездок и туризма.

В то же время расположение Армении в Южном Кавказе имеет стратегическое значение для транзитных воздушных перевозок и может обеспечить значительный потенциал превращения Армении в авиационный узел между Азией и Европой.

Для развития воздушного транспорта Армении особое значение приобретает единая транспортная политика в рамках ЕАЭС [10], членом которой республика является с 2 января 2015 года. Отметим, что интеграция в сфере воздушного транспорта в соответствии с Приложением № 24 к Договору о ЕАЭС осуществляется путем поэтапного формирования общего рынка транспортных услуг в этой сфере, в частности, на следующих принципах:

- обеспечение соответствия международных договоров и актов, составляющих право ЕАЭС, нормам и принципам международного права в области гражданской авиации;
- гармонизация законодательства государств-членов в соответствии с нормами и принципами международного права в области гражданской авиации;
- обеспечение справедливой и добросовестной конкуренции;
- снижение негативного воздействия гражданской авиации на окружающую среду;
- создание условий для обновления парка воздушных судов, модернизации и развития объектов наземной инфраструктуры аэропортов в соответствии с требованиями и рекомендуемой практикой Международной организации гражданской авиации (ИКАО);
- обеспечение недискриминационного доступа авиационных компаний государств-членов к авиационной инфраструктуре;

- обеспечение безопасности полетов и авиационной безопасности;

- расширение воздушных сообщений между государствами-членами.

В соответствии с указанными принципами были разработаны Основные направления и этапы реализации скоординированной (согласованной) транспортной политики государств — членов ЕАЭС в части воздушного транспорта, а также план мероприятий (дорожная карта) по их реализации на 2018–2020 гг. (утв. Решением Евразийского межправительственного совета от 14 августа 2017 г. № 2) [11].

Анализ показывает, что в транспортной структуре грузоперевозок лидирует автомобильный транспорт (70 %), на долю железнодорожного приходится 18 %, трубопроводного — 11...12 %, воздушного транспорта — 0,1 % [12].

В структуре перевозки пассажиров также основным является автомобильный транспорт (более 75 %), на долю железнодорожного приходится 0,4 %, а на воздушный транспорт — 2,2 % [12]. Причем в последние годы воздушный транспорт Армении показывает определенную динамику, что видно из показателей, приведенных в таблице 1.

Сегодня на территории страны работают три международных аэропорта, два из которых выполняют рейсы на постоянной основе:

- Звартноц, расположенный в 10 км от г. Еревана, считается главными воздушными воротами Армении;

- Ширак, расположенный в 5 км от г. Гюмри (2-го по значению города страны).

Концессионером армянских аэропортов Звартноц и Ширак является аргентинская компания Согрогасион Амегиса, которая сделала более 100 млн долл. США инвестиции по утвержденному Правительством РА «Мастер-плану». Компания планирует дальнейшее развитие и расширение аэропорта, что позволит значительно увеличить пассажиропоток, количество рейсов и направлений.

Так, по состоянию на 31 декабря 2022 г. в РА действуют девять авиакомпаний, имеющих сертификат эксплуатанта воздушных судов, пять из которых имеют сертификат на осуществление регулярных коммерческих авиаперевозок. В 2021 г. было семь авиакомпаний, а к концу 2023 г. прогнозируется рост их количества до 11. Увеличивается и количество иностранных авиакомпаний, вышедших на рынок РА: в 2021 г. их было четыре, а в 2022 году — уже девять. В настоящее время

рейсы в РА и из нее выполняют 35 авиакомпаний по 45 направлениям в 23 страны.

Пассажиропоток аэропортов РА (аэропорты «Звартноц» и «Ширак») в 2021 г. достиг 2 400 351 чел., а в 2022 г. — 3 697 539. Из них 718 тыс. российскими авиакомпаниями, 1,3 млн — авиакомпаниями других стран. Рост составил 54 %. На долю местных авиакомпаний в 2021 г. пришлось 269 087 чел., а в 2022 г. — 916 524 чел., т. е. 25 % от общего объема пассажирских перевозок.

Грузоперевозки аэропортов РА (аэропорт «Звартноц») в 2021 г. составил 17 321 т, а в 2022 г. — 23 341 т. Из них в 2021 г. только армянскими компаниями — 2100 т.

В рамках развития воздушного транспорта республики в 2022 г. во время визита в Ереван генеральный директор Airports Council International (Международный совет аэропортов — АСI) в Европейском регионе заявил о готовности инвестировать 400 млн евро для удвоения пропускной способности аэропорта Звартноц как для пассажирских, так и для грузовых перевозок, ввиду увеличения пассажиропотока, который существенно превысил показатель 2019 г., а также предстоящего включения Армении в общее авиационное пространство ЕС.

В январе 2023 г. в административном порядке вступило в силу Соглашение о единой авиационной зоне между Европейским Союзом и Арменией. Документ был подписан 15 ноября 2021 г. и направлен на устранение рыночных ограничений и создание общего авиационного пространства между Арменией и ЕС. Это означает, что все авиакомпании ЕС и армянские авиакомпании смогут совершать прямые рейсы из любой точки ЕС в любой аэропорт Армении. Будут сняты все ограничения на полеты между Арменией и ЕС, а положения об открытой и честной конкуренции обеспечат равные условия игры.

Благодаря этому соглашению Армения приведет свое законодательство к большему соответствию с авиационными правилами и стандартами ЕС в таких областях, как: безопасность полетов, управление воздушным движением, окружающая среда, экономическое регулирование, конкуренция, защита прав потребителей и социальные аспекты.

В соответствии с обязательствами Соглашения о всеобъемлющем и расширенном партнерстве между Европейским Союзом и Арменией в 2023 г. ЕС начнет

Таблица 1 — Основные показатели работы воздушного транспорта в Армении

Показатели	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Перевозка пассажиров (миллион пассажиров)	2,6	2,9	3,6	0,9	2,4	3,7
Динамика объема перевозок пассажиров по видам транспорта (в процентах к предыдущему году)	120,6	111,9	125,9	24,7	в 2,7 раза больше	154,0
Перевозки грузов (тысяч тонн)	22,4	18,1	20,7	16,0	17,3	23,2
Динамика объема перевозок грузов по видам транспорта (в процентах к предыдущему году)	122,4	80,8	114,4	77,3	108,1	134,1

всестороннее содействие развитию потенциала гражданской авиации Армении.

Более того, в марте 2022 г. совместно с Агентством по авиационной безопасности ЕС была запущена двухлетняя программа технической помощи, финансируемая ЕС, направленная на содействие Армении в расширении ее возможностей по надзору за безопасностью полетов.

Концепция «Сухой порт»

Оптимизация функционирования транспортных коридоров и маршрутов государствами — членами ЕАЭС непосредственно связана с реализацией комплексного плана развития евразийских транспортных коридоров, расширением сети Азиатских автомобильных дорог и сети Трансазиатских железных дорог, созданием и развитием «сухих портов» на своей территории, а также внедрением новых технологий управления транспортными потоками.

В этом контексте важное значение приобретает снятие до 2025 г. существующих ограничений при осуществлении перевозок всеми видами транспорта в рамках Евразийского экономического союза.

Развитие воздушного транспорта Армении непосредственно связано с развитием транспортно-логистических инфраструктур страны и их интеграцией в транспортно-логистические инфраструктуры стран — участниц ЕАЭС. В связи с этим большое значение приобретает строительство в Гюмри новой промышленной зоны и большого логистического узла — «сухой порт», который от грузового терминала отличается большим оборотом и сложной инфраструктурой. Так как в Армении в настоящее время нет большого потока грузов, то возникает необходимость на том же месте построить промышленную зону, что позволит сократить расходы на транспортировку продукции.

Предусмотрено построить «сухой порт», на будущей объездной дороге Гюмри, которая предусмотрена в рамках международного транспортного коридора «Север — Юг». Пиковых показателей по грузопотоку сухой порт может достичь через два-три года. Тогда же будет готова и недостающая инфраструктура автодороги «Север — Юг», т. е. и дорога, объезжающая Гюмри, и участок Сисиан — Каджаран.

Гюмрийский аэропорт имеет возможности принимать и грузовые самолеты, т. к. взлетно-посадочная полоса была построена для тяжелых самолетов «Антонов» (в том числе АН-124 «Руслан» грузоподъемностью 120 т).

За первые два года объем воздушных перевозок составит 2...3 рейса в неделю. Это позволит их обслуживать по тарифам, выгодным международным компаниям. Если достроить взлетно-посадочную полосу гюмрийского аэропорта до будущего «порта», появится также возможность загружать самолеты непосредственно из производственных помещений или складов без дополнительных расходов на промежуточной погрузке. Таким образом, со временем определенную часть грузопотока по коридору «Север — Юг» возьмет на себя гюмрийский порт. По предварительным оценкам в 2025 г. оборот составит около 52 тысяч грузовых контейнеров, в 2030 г. — почти 105 тысяч [13].

Подготовка кадров и обучение работников транспорта

Безопасность, в т. ч. экологическая, эффективность эксплуатации транспортных средств требуют специалистов с компетенциями, отвечающими требованиям современного рынка труда. Необходимо отметить, что в 2022 г. авиационный сектор РА пополнился 500 новыми сотрудниками.

Средняя численность работников государств — членов ЕАЭС представлена в таблице 2 [14].

Таблица 2 — Показатели занятости в сфере экономической деятельности «Транспорт и складирование»

Государство	2019 г.	2020 г.	2021 г.
Республика Армения, чел.	20 873	20 176	20 407
Республика Беларусь, чел.	275 171	266 525	259 505
Республика Казахстан, чел.	230 615	220 402	217 395
Кыргызская Республика, чел.	19 575	18 506	18 852
Российская Федерация, чел.	2 618 280	2 646 863	2 648 591

В Республике Армения в сфере экономической деятельности «Транспорт и складирование» в 2021 г. было занято 20 407 чел. по сравнению с предыдущим годом наблюдается рост числа занятых. Однако за 2020 г. темп прироста числа занятых в сфере был отрицательным, и позитивная динамика 2021 г. не обеспечила восстановление до показателей 2019 г.

Тем не менее, планируемое развитие транспортной инфраструктуры диктует необходимость повышенного внимания подготовки авиационных специалистов. Регулирование вопросов обучения и подготовки кадров находится в сфере компетенции Министерства образования, науки, культуры и спорта Республики Армения.

В республике подготовку кадров с высшим техническим образованием в области воздушного транспорта осуществляет Национальный политехнический университет Армении (НПУА), который обеспечивает выпуск инженеров-бакалавров (с 4-летним обучением) по 105 специальностям и инженеров-магистров по 19 специальностям.

Бакалавриат:

- Авиационная и ракетная техника;
- Авиационные приборы летательных аппаратов.

Магистратура:

- Авиационная и ракетная техника.

В 2022 г. был разработан образовательный стандарт и модульные учебные программы для колледжа по специальности «Техническая эксплуатация и обслуживание беспилотных летательных аппаратов».

Современный рынок труда требует специалистов, обладающих компетенциями и навыками, основанными на инновационных технологиях. В этой связи важное значение приобретает развитие научно-технического и образовательного сотрудничества между высшими учебными заведениями стран — участниц ЕАЭС по подготовке кадров, повышению квалификации молодых специалистов и преподавательского состава, обмену информацией, а также совместные международные проекты.

Отметим, что уже создан хороший фундамент между Национальным политехническим университетом Армении и Белорусской государственной академией авиации. В апреле 2023 года подписан договор о сотрудничестве между двумя вузами, что послужит примером для развития двустороннего и многостороннего взаимовыгодного сотрудничества и с другими вузами стран – участниц ЕАЭС. В настоящее время разработана дорожная карта по целевым направлениям с конкретными сроками действия.

Заключение

Развитие воздушного транспорта Армении как составляющей единой транспортной системы ЕАЭС необходимо рассмотреть по следующим направлениям:

- усиление соответствующего международным стандартам контроля в сфере, привлечение квалифицированных специалистов в результате сотрудничества с международными партнерами;
- подготовка и повышение квалификации кадров,

гармонизация образовательных программ и компетенций в рамках ЕАЭС;

- продолжение последовательных работ по пересертификации армянских авиакомпаний;
- внедрение программ, направленных на повышение эффективности управления, переподготовки преподавателей и инструкторов авиационной специализации;
- создание современных авиационных учебных центров в соответствии с международными стандартами;
- развитие общей и малой авиации, внутренних пассажирских и грузовых перевозок, международных грузоперевозок, обновление подвижного парка воздушного транспорта;
- цифровизация транспортных инфраструктур, обучение работников компетенциям цифровой экономики;
- развитие научно-технического сотрудничества между учреждениями и организациями стран – участниц ЕАЭС;
- реализация институциональных преобразований для повышения эффективности управления с сфере гражданской авиации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Корпоративный фонд KAZLOGISTICS [Электронный ресурс]: Анализ статистических данных транспортной отрасли в разрезе видов транспорта за период с 2012 по 2016 годы. – Режим доступа: <https://kazlogistics.kz/upload/iblock/008/008940f46e6d5626dce29d3a170d8c55.pdf>. – Дата доступа: 21.05.2023.
2. The International Air Transport Association [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iata.org>. – Дата доступа: 21.05.2023.
3. Rodrigue, J. P. Logistics and National Security // J. P. Rodrigue, B. Slack // Science, Technology and National Security (Pennsylvania Academy of Science). – 2002. – P. 214–225.
4. Якунин, В. И. Политология транспорта: политическое измерение транспортного развития / В. И. Якунин. – М.: Экономика, 2006. – 433 с.
5. Пехтерева, Е. А. Пассажирские авиаперевозки в период пандемии Covid-19 / Е. А. Пехтерева // Экономические и социальные проблемы России. – 2021. – № 3. – С. 13–36. DOI: 10.31249/espr/2021.03.01
6. Aviation explorer [Электронный ресурс]: Новости: Авиаперевозки в мире к 2024 году превысят допандемийный уровень. – Режим доступа: <https://www.aex.ru/news>. – Дата доступа: 22.04.2022.
7. Национальная стратегия обеспечения транспортной безопасности Республики Армения: Приложение к поручению Президента РА N183 от 23 октября 2013 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mfa.am/filemanager/Statics/Doctrinerus.pdf>. – Дата доступа: 22.04.2023.
8. Давтян, В. С. Геополитическое измерение энергетической и транспортно-логистической безопасности Армении / В. С. Давтян. – Ереван: Изд-во ЕГЛУ, 2019. – 389 с.
9. Пак, Е. В. Перспективы развития сотрудничества в области транспорта и логистики в Евразийском экономическом союзе: автореф. дис. ... канд. экон. наук / Е. В. Пак. – М., 2017. – С. 45.
10. Чибухчян, С. Воздушный транспорт Армении: состояние и перспективы развития / С. Чибухчян, О. Чибухчян, К. Игитян // Логистика. – 2023. – № 1. – С. 22–25. DOI: 10.54959/22197222_2023_01_22.
11. Транспорт: Инфраструктура [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.eurasiancommission.org/ru/act/integr_i_makroec/dep_stat/fin_stat/statistical_publications/Documents/finstat_6/finstat_6_2020.pdf. – Дата доступа: 22.04.2023.
12. Статистический комитет Республики Армения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.armstat.am/am>. – Дата доступа: 22.04.2022.
13. Южно-Кавказская железная дорога [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.railway.am/ru/about>. – Дата доступа: 22.04.2022.
14. Международный транспортный коридор «Север – Юг»: создание транспортного каркаса Евразии. Доклад [Электронный ресурс] / Е. Винокуров и др. – Алматы, Москва: Евразийский банк развития, 2021. – Режим доступа: https://eabr.org/upload/iblock/c69/EDB_2021_Report_5_INSTC_rus.pdf. – Дата доступа: 22.04.2022.

REFERENCES

1. KAZLOGISTICS Corporate Foundation [Electronic resource]: Analysis of statistical data of the transport industry by mode of transport for the period from 2012 to 2016, available at: <https://kazlogistics.kz/upload/iblock/008/008940f46e6d5626dce29d3a170d8c55.pdf>. (accessed 21 may 2023).
2. The International Air Transport Association [Electronic resource], available at: <https://www.iata.org> (accessed: 21 may 2023).
3. Rodrigue J. P., Slack B. Logistics and National Security // J. P. Rodrigue, // Science, Technology and National Security (Pennsylvania Academy of Science), 2002, pp. 214-225.
4. Jakunin V.I. Politologija transporta: politicheskoe izmerenie transportnogo razvitiya [Political science of transport: political dimension of transport development]. Moscow, Jekonomika, 2006, 433 p.
5. Pehtereve E.A. Passazhirskie aviaperevozki v period pandemii Covid-19 [Passenger air transportation during the Covid-19 pandemic] Jekonomicheskie i socialnye problemy Rossii, 2021, no. 3, pp. 13-36. doi: 10.31249/espr/2021.03.01
6. Aviation explorer: News: Air transportation in the world will exceed pre-pandemic levels by 2024, available at: <https://www.aex.ru/news> (accessed: 22 april 2022).
7. Nacional'naja strategija obespechenija transportnoj bezopasnosti Respubliki Armenija: Prilozhenie k porucheniju Prezidenta RA N183 ot 23 oktjabrja 2013 g., available at: <https://www.mfa.am/filemanager/Statics/Doctrinerus.pdf> (accessed: 21 may 2023).
8. Davtjan V.S. Geopoliticheskoe izmerenie jenergeticheskij i transportno-logisticheskij bezopasnosti Armenii [Geopolitical dimension of energy, transport and logistics security of Armenia]. Erevan, Erevanskij gosudarstvennyj lingvisticheskij universitet, 2019, 389 p.
9. Pak E.V. Perspektivy razvitiya sotrudnichestva v oblasti transporta i logistiki v Evrazijskom jekonomicheskom sojuze [Prospects for the development of cooperation in the field of transport and logistics in the Eurasian Economic Union]: Abstract of Ph. D. thesis. Moscow, 2017. 45 p.
10. Chibuhchjan S., Chibuhchjan O., Igitjan K. Vozdushnyj transport Armenii: sostojanie i perspektivy razvitiya [Air transport of Armenia: state and development prospects] Logistika, 2023, no. 1, pp. 22-25. DOI:10.54959/22197222_2023_01_22.
11. Transport. Infrastructure, available at: www.eurasiancommission.org/ru/act/integr_i_makroec/dep_stat/fin_stat/statistical_publications/Documents/finstat_6/finstat_6_2020.pdf (accessed: 22 april 2023).
12. Statistical Committee of the Republic of Armenia, available at: <https://www.armstat.am/am> (accessed: 22 april 2022).
13. South Caucasian Railway, available at: <https://www.railway.am/ru/about> (accessed: 22 april 2022).
14. Vinokurov E., Ahunbaev A., Shashkenov M., Zabeov A. Mezhdunarodnyj transportnyj koridor «Sever – Jug»: sozdanie transportnogo karkasa Evrazii. Doklad. – 2021/5 [International transport corridor "North – South": creating a transport framework for Eurasia. Report]. Almaty, Moscow: Evrazijskij bank razvitiya, available at: https://eabr.org/upload/iblock/c69/EDB_2021_Report_5_INSTC_rus.pdf. (accessed: 22 april 2022).

Статья поступила в редакцию
18.07.2023

ИСТОРИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРАВОВОГО ИНСТИТУТА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

HISTORICAL PREREQUISITES FOR THE FORMATION OF THE LEGAL INSTITUTE FOR FLIGHT SAFETY IN THE REPUBLIC OF BELARUS

Довнар Таисия Ивановна – доктор юридических наук, профессор, профессор кафедры теории и истории государства и права юридического факультета Белорусского государственного университета, Республика Беларусь

Taisiya Dovnar – Doctor of Law, Professor, Professor of the Department of Theory and History of State and Law of the Faculty of Law of the Belarusian State University, Republic of Belarus

Гринев Игорь Викторович – соискатель кафедры теории и истории государства и права юридического факультета Белорусского государственного университета, Республика Беларусь

Igor Grinov – Postgraduate student of the Department of Theory and History of State and Law of the Faculty of Law of the Belarusian State University, Republic of Belarus

Аннотация: в статье рассматриваются вопросы формирования законодательства, регулирующего обеспечение безопасности полетов и его теоретических положений, исторические аспекты формирования воздушного права в качестве самостоятельной отрасли и деление ее на правовые институты, вопросы преемственности положений воздушного права досоветского и советского периодов, а также вопросы допустимости имплементации положений международного воздушного права в правовую систему Республики Беларусь.

Ключевые слова: безопасность полетов, воздушное право, история права, отрасль права, институт права, правовое регулирование.

Abstract: the article discusses the issues of the formation of legislation regulating flight safety and its theoretical provisions, historical aspects of the formation of air law as an independent branch and its division into legal institutions, issues of continuity of the provisions of air law of the pre-Soviet and Soviet periods, as well as issues of the admissibility of the implementation of the provisions of international air law in the legal system of the Republic of Belarus.

Keywords: safety, air law, history of law, branch of law, institute of law, legal regulation.

Введение

Обеспечение безопасности полетов является важным принципом функционирования авиационного транспорта, в соответствии с которым необходимо не только повышать требования к деятельности авиационных организаций, содержанию объектов авиационной инфраструктуры и авиационной техники, квалификации авиационного персонала и другим условиям эксплуатации, организации и производства полетов, но и совершенствовать правовое регулирование в данной сфере. В этом контексте необходимо научное исследование исторического опыта системы обеспечения безопасности полетов.

Изменившиеся условия использования авиации в условиях санкций диктуют актуальность гармониза-

ции правового регулирования с учетом исторического опыта, преемственности обеспечения эксплуатации воздушных судов, требующих в кооперации с Российской Федерацией получения компетенций в сфере проектирования и строительства воздушных судов и их использования в общем воздушном пространстве, в том числе как эффективного участника и равноправного партнера международного проекта «Один пояс — один путь».

На всех этапах развития авиации мероприятия по обеспечению безопасности полетов базировались на систематизации причин авиационных происшествий и их анализе. Только установив ретроспективу развития авиационного происшествия, можно судить о его причинах и мерах по их устранению или предупреждению.

Основная часть

Одним из наиболее важных видов обеспечения безопасности полетов является расследование авиационных инцидентов и происшествий. Впервые в мировой авиации институт расследования авиационных происшествий появился в 1908 году после того как была создана аварийная комиссия по расследованию причин гибели Томаса Селфриджа в испытательном полете на самолете братьев Райт [1, с. 5].

Важным направлением, обеспечивающим безопасность полетов, является институт поиска и спасания, сформировавшийся в окончательном виде на основе опыта Второй мировой войны, локальных вооруженных конфликтов и обеспечения первых полетов космических объектов.

Объективный контроль — не менее важный элемент в системе обеспечения безопасности полетов. Первые наработки методики оценки безопасности полетов появились в России в созданном в 1916 году Расчетно-испытательном бюро (которым руководил Н. Е. Жуковский) при Управлении военного воздушного флота (УВВТ). Сама аппаратная часть системы объективного контроля, размещаемая на летательном аппарате, впервые была запатентована в США в 1939 году [1, с. 7].

Эргономическое направление обеспечения безопасности полетов появилось на стыке психологии и авиационной техники и начало формироваться в 40-х годах прошлого века.

Благодаря эргономике обеспечение безопасности полетов стало рассматривать факторы «человек — машина — среда» как связанные понятия, определив «эксплуатационную среду» как важный элемент, влияющий на аварийность летательных аппаратов.

Появились теории безопасности полетов, основанные на моделях профессора Фрэнка Хоукинса «SHEL», «швейцарского сыра» профессора Дж. Ризона и модели «УТЕМ» разработки Техасского университета в г. Остин (США).

Подписание странами — участниками международной конференции в Чикаго 7 декабря 1944 года Конвенции о международной гражданской авиации [2] и учреждения сначала временной, а затем постоянной Международной организации гражданской авиации (ИКАО) — важный этап в истории развития института обеспечения безопасности полетов.

Вопросы обеспечения безопасности полетов в ИКАО разрабатывались путем принятия соответствующих Приложений к Конвенции о международной гражданской авиации и проведения Специализированных совещаний и Совещаний (конференций) высокого уровня.

В 1979 году было проведено Специализированное совещание по предотвращению и расследованию авиационных происшествий, в результате которого в 1984 году было разработано и утверждено «Руководство по предотвращению авиационных происшествий (РПАП ИКАО 1984)» [3].

В 2006 году ИКАО провела Конференцию генеральных директоров гражданской авиации по Глобальной стратегии обеспечения безопасности полетов (DGCA/06), в результате которой в 2006 году было утверждено «Руководство по управлению безопасностью полетов» (РУБП ИКАО) и в 2013 году принято

«Приложение 19 «Управление безопасностью полетов». В настоящее время действует четвертая редакция РУБП ИКАО [4] и вторая редакция Приложения 19 [5].

Концептуальным источником правового регулирования вопросов обеспечения безопасности полетов является Глобальный план обеспечения безопасности полетов (ГПБП), принимаемый на период 2–3 года и впоследствии обновляемый. Первый был принят в 1997 году. В настоящее время действует шестой: ГПБП 2023–2025 гг. [6].

Приложение 19, РУБП и ГПБП требуют от государств — членов ИКАО создания Государственной программы обеспечения безопасности полетов (ГосПБП) и разработки системы управления безопасностью полетов авиационных предприятий и организаций (СУБП); введения контроля по восьми критическим элементам обеспечения безопасности полетов:

- основное авиационное законодательство;
- конкретные нормативные акты по вопросам эксплуатации;
- государственная система гражданской авиации;
- государственные функции контроля за обеспечением безопасности;
- квалификация и подготовка технического персонала;
- технический инструктивный материал, инструменты и предоставление важной информации с точки зрения безопасности полетов;
- обязательства по выдаче свидетельств, сертификации, санкционированию и утверждению;
- обязательства по надзору и разрешению проблем обеспечения безопасности, в рамках системы Универсальной программы проверок организации контроля за обеспечением безопасности полетов (УППКБП) [7].

Дальнейшим развитием ГосПБП и СУБП является региональное совершенствование обеспечения безопасности полетов, т. е. нормотворчество в направлении, объемах и скорости соответствующих степени развития авиации в конкретном авиационном регионе [8].

Со вступлением в 1970 году СССР в ИКАО и присоединением к Конвенции о международной гражданской авиации 1944 года на СССР стали распространяться требования по гармонизации своего внутреннего воздушного законодательства с международным воздушным законодательством и его имплементации.

Целью обеспечения безопасности полетов является достижение глобальных приоритетов, определенных ИКАО в области безопасности полетов: снижение показателей аварийности до уровня, не превышающего более чем в два раза среднемировые показатели; сокращение числа авиационных катастроф и связанных с ними человеческих жертв, чтобы к 2030 году свести к нулю число погибших в авиационных катастрофах [9].

В Республике Беларусь правовое регулирование обеспечения безопасности полетов началось подписанием Соглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства (12–25 декабря 1991 года) [10] и продолжилось вступлением в члены ИКАО [11] и имплементацией и гармонизацией его требований в свое национальное законодательство.

История правового регулирования обеспечения безопасности полетов в СССР определяет концептуальные рамки также и для Республики Беларусь.

Указ Екатерины II о запрещении пускать воздушные шары с 1 марта по 1 декабря из-за опасности возникновения пожаров от 4 апреля 1784 года № 15793 (Санкт-Петербург) [12, с. 22] и Отношения московских генерал-губернаторов А. Н. Щербатова от 15 февраля 1847 года № 1056 (Москва) [12, с. 59], Закревского от 17 мая 1849 года № 5679 (Москва) [12, с. 65] и от 20 июля 1849 года № 7118 (Москва) [12, с. 78] были первыми актами правового регулирования обеспечения безопасности воздухоплавания в России, где последнее еще не выделялось в отдельный вид деятельности [12, с. 78].

Приказ по военному ведомству от 14 июля 1890 года № 126 (Санкт-Петербург) о сформировании учебного воздухоплавательного парка и утверждении положения о нем, а также о создании воздухоплавательного парка [12, с. 455], открыл новый этап правового регулирования воздухоплавания в России, поставив воздухоплавание на службу государству.

Авиационным происшествиям с человеческими жертвами — катастрофам — авиация России ведет отсчет с 24 сентября 1910 года, когда при выполнении демонстрационного полета на первом Всероссийском празднике воздухоплавания, названном «Первой авиационной неделей», в Петербурге погиб летчик капитан А. В. Мациевич. По результатам расследования этого события Г. Е. Котельников создал ранцевый парашют — изобретение, определившее самостоятельное направление в правовом регулировании обеспечения безопасности полетов [13].

После проведения первого Всероссийского праздника воздухоплавания в 1910 году решением Великого князя Александра Михайловича на базе Санкт-Петербургского Воздухоплавательного парка образовано Главное военное управление воздушного флота (УВВФ) (Главвоздухофлот), на которое были возложены задачи обеспечения безопасности полетов и правового регулирования деятельности авиации. В мае 1918 года, реформированный в Главное управления Рабоче-Крестьянского Красного Военно-Воздушного Флота, сохранивший свое прежнее краткое наименование: Главвоздухофлот, образовал 1 декабря 1922 года в своем составе Инспекцию гражданского воздушного флота, которую наделил полномочиями по правовому регулированию воздушных передвижений, оставив за собой функции технического регулирования (и обеспечения безопасности полетов) [14, с. 6].

Первым кодифицированным актом воздушного законодательства Советской Республики следует считать Декрет «О воздушных передвижениях» в воздушном пространстве над территорией Российской Социалистической Федеративной Советской Республикой и над ее территориальными водами, принятый Советом народных комиссаров РСФСР (СНК РСФСР) от 17 января 1921 г. в связи с возникшей необходимостью урегулировать вопросы воздушного сообщения между РСФСР и Эстонией [15] и вопросы пересечения государственной границы, за основу которого было принято международное Соглашение о воздушном передвижении, подписанное 13 октября 1919 года в Париже, но к 1921 году еще не вступившее в законную силу [16].

В развитие положений Декрета «О воздушных передвижениях» в 1927 году управлением ОСАВИАХИМ был выпущен сборник правовых актов, регулирующих

воздушное передвижение [17], который в 1930 году был переиздан [18]. Их теоретической основой стал изданный в 1922 году за авторством Главного инспектора Инспекции гражданского воздушного флота профессора И. С. Перетерского курс «воздушного права» (переиздан в 1923 г.), где И. С. Перетерский указывает на необходимость деления воздушного права на правовые институты, в том числе указывает на необходимость правового института регулирующего максимальные гарантии безопасности полетов [19, с. 90].

В 1934 году вышла книга Н. А. Жемчужина «Общие вопросы безопасности полетов», где анализировались причины аварийности, указывалось на опасные факторы и мероприятия по повышению безопасности полетов, делался вывод о единстве технических, организационных и личностных факторов, определяющих предмет регулирования безопасности полетов [1, с. 7].

В 1931 году Соглашение о воздушном передвижении РСФСР было переименовано в Воздушный кодекс СССР, а в 1932 году заменено на новый Воздушный кодекс [20], в котором в отличие от Соглашения о воздушном передвижении регулирование деятельности государственной авиации не предусматривалось. Это сохранилось и в редакциях Воздушного кодекса СССР 1935 [21] и 1962 [22] годов.

В 1983 году была утверждена пятая редакция Воздушного кодекса СССР (введена в действие с 1 января 1984 года) [23], в которой вернулись к регулированию всех видов авиации (гражданской, государственной, экспериментальной). В ней изложены положения обеспечения безопасности полетов, которые в предыдущих редакциях отсутствовали (1932, 1935) либо были нечетко прописаны (1962). Был учтен факт вступления СССР в ИКАО и присоединения к Конвенции о международной гражданской авиации, наличие подзаконных актов воздушного законодательства: Основных правил полетов на территории (в воздушном пространстве) СССР (ОПП), Наставлений по производству полетов в гражданской авиации СССР (НПП ГА), сформированных Инспекций по безопасности полетов и Главной инспекции по безопасности полетов (Госавианадзор), системы Управления воздушным движением и делением воздушного пространства на зоны и районы (диспетчерского, консультативного, полетно-информационного обслуживания) и системы Поисково-спасательного обеспечения.

На основании принятого ВК СССР 1984 года в 1985 году утверждены и введены в действие обновленные: Основные правила полетов в воздушном пространстве СССР (ОПП-85) [24] и Наставление по производству полетов в гражданской авиации СССР (НПП ГА-85) [25], которые применялись в странах Содружества Независимых Государств до принятия ими своих правовых актов.

Наиболее значимым теоретическим трудом сформировавшим воздушное право как отрасль правового регулирования и определившим его основные правовые институты считается двухтомник «Международное воздушное право» Института государства и права Академии Наук СССР, разработанный коллективом авторов, под руководством д.ю.н. А. П. Мовчана, выпущенный в печать в 1980—1981 годах [26], который определил направления научных исследований в области воздушного права на последующие десятилетия.

Заклучение

К обеспечению безопасности полетов современные условия предъявляют новые требования по комплексности предмета регулирования.

Развиваясь как комплексная отрасль юридической науки, воздушное право представляет собой совокупность институтов, регулирующих как публичные, так и частные правоотношения, обусловленные весьма значительным объемом правовых актов, входящих в его систему и затрагивающих такие сферы правового регулирования, как расследование авиационных происшествий, техническое регулирование разработки и производства летательных аппаратов, международно-правовое регулирование, хозяйственное, административно-правовое и др.

Правовое регулирование обеспечения безопасности полетов — новый и быстро развивающийся институт права в правовой системе Республики Беларусь. Его место обусловлено предметом, кругом регулируемых общественных отношений, влиянием международных авиационных процессов, а также особенностями присущими ему методов правового регулирования, основанных на принципах исключительного государственного суверенитета над своим воздушным пространством, свободы полетов в международном воздушном пространстве, необходимости гармонизации с нормами Конвенции о международной гражданской авиации, принципом безопасности авиационной деятельности.

Специфический взгляд на правовое регулирование обеспечения безопасности полетов как на институт права, на процесс регулирования практической деятельности и набора компетенций заложен уже в самом термине «обеспечение безопасности полетов», над которым до настоящего времени ведутся дискуссии и обсуждения в различных документах ИКАО и научных статьях. Оно рассматривается и как научная концепция (наравне с концепциями предотвращения авиационных происшествий и управления безопасностью полетов, или как их общая характеристика), и как направление практической деятельности.

Для определения этого правового института, его дифференциации от иных институтов воздушного права был использован термин «безопасность полетов», который представляет собой состояние авиационной деятельности и в рамках которого изучается взаимодействие опасных факторов эксплуатационной среды и их влияние на исход полета.

Относительно предмета обеспечения безопасности полетов необходимо обратиться к сложившемуся в праве и поддерживаемому подавляющим большинством специалистов мнению: предмет обеспечения безопасности полетов составляют общественные отношения, возникающие по поводу организации и выполнения полетов летательным аппаратом в воздушной и эксплуатационной среде.

Следует отметить, что эксплуатационная и воздушная среды — это часть среды обитания человека в его рабочей и повседневной жизни, которые взаимно сочетаются с присущими им опасностями и угрозами, связанными с такими факторами, как высота, разреженность воздуха, скорость передвижения, наличие поддерживающей способности только при определенных условиях.

Обеспечение безопасности эксплуатационной авиационной среды — это поддержание деятельности на каком-то допустимом уровне с минимально необходимыми усилиями при одновременном следовании цели достижения высокой эффективности процесса обеспечения.

Правовое регулирование такой среды — это упорядочение общественных отношений путем издания соответствующих правил или предоставление определенных полномочий по ее изменению или корректировке.

Таким образом, современное авиационное законодательство Республики Беларусь и его правовой институт обеспечения безопасности полетов, заключая в себе традиции правового регулирования авиационной деятельности досоветского периода, советского периода и передовые международные концепции, представляется достаточно развитым и систематизированным, способным решать задачи по обеспечению разработки, производству и безопасной эксплуатации воздушных судов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Попов, Ю. В. Расследование авиационных происшествий — безопасность полетов в исторической ретроспективе / Ю. В. Попов // Проблемы безопасности полетов. — 2012. — № 1. — С. 4–22.
2. Конвенция о международной гражданской авиации [Электронный ресурс]: [заключена в г. Чикаго 07.12.1944] // илех : информ. правовая система / ООО «ЮрСпектр», Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. — Минск, 2023.
3. Руководство по предотвращению авиационных происшествий [Электронный ресурс]. — 1-е изд. — Монреаль: ИКАО, 1984. — Режим доступа: https://sparcatc.ru/files/ICAO_Doc-9422-Rukovodstvo-po-predotvrazhcheniyu-aviacionnyh-proisshestviy.pdf. — Дата доступа: 27.03.2023.
4. Руководство по управлению безопасностью полетов [Электронный ресурс]. — 4-е изд. — Монреаль: ИКАО, 2018. — Режим доступа: <https://e.eruditor.one/file/2992363/>. — Дата доступа: 27.03.2023.
5. Приложение 19 к Конвенции о международной гражданской авиации. Управление безопасностью полетов [Электронный ресурс]. — 2-е изд. — Монреаль: ИКАО, 2016. — Режим доступа: https://caa.gov.kz/storage/app/media/%D0%B4%D1%83%D0%B1%D0%BF/AN19_cons_RU.pdf. — Дата доступа: 27.03.2023.
6. Глобальный план обеспечения безопасности полетов [Электронный ресурс]: изд. 2023–2025 гг., doc. 10004 // Международная организация гражданской авиации. — Режим доступа: https://www.icao.int/Meetings/a41/Documents/10004_ru.pdf. — Дата доступа: 27.10.2023.
7. Руководство по непрерывному мониторингу в рамках Универсальной программы проверок организации контроля за обеспечением безопасности полетов [Электронный ресурс]: doc. 9735 AN/960. — 3-е изд. — [Монреаль]: Междунар. орг. гражд. авиации, 2011. — Режим доступа: https://aerohelp.ru/sysfiles/374_252.pdf. — Дата доступа: 27.10.2023.
8. Руководство по организации контроля за обеспечением безопасности полетов. Часть В. Создание региональной организации по контролю за обеспечением безопасности полетов и управление этой организацией [Электронный ресурс]: doc. 9734 AN/959. — 2-е изд. — [Монреаль]: Междунар. орг. гражд. авиации, 2011. — Режим доступа: https://aerohelp.ru/sysfiles/374_250.pdf. — Дата доступа: 27.10.2023.
9. Бенжамен, Р. Безопасность полетов и авиационная безопасность остаются главными приоритетами [Электронный ресурс] / Р. Бенжамен // Журн. ИКАО. — 2010. — Т. 65, № 2. — Режим доступа: https://www.icao.int/publications/DownloadButton/6502_ru.pdf. — Дата доступа: 26.10.2023.
10. Соглашение о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства [Электронный ресурс]: [заключено в г. Минск 12.12.1991–25.12.1991] // илех : информ. правовая система / ООО «ЮрСпектр», Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. — Минск, 2023.
11. О присоединении Республики Беларусь к Чикагской конвенции о Международной гражданской авиации [Электронный ресурс]: постановление Верхов. Совета Респ. Беларусь, 9 дек. 1992 г., № 2022-XII // КонсультантПлюс. Беларусь / ООО «ЮрСпектр», Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. — Минск, 2023.
12. Воздухоплавание и авиация в России до 1907 г.: сб. док. и материалов / Акад. наук СССР, Ин-т истории естествознания и техники; под ред. В. А. Попова. — М.: Оборонгиз, 1956. — 952 с.

13. Руководство по парашютно-спасательной подготовке гражданской авиации : РПСП ГА-86: утв. М-вом гражд. авиации 18.04.86. – М. : Воздуш. трансп., 1987. – 63 с.
14. Волков, М. М. Управление в области гражданской авиации СССР : учеб. пособие / М. М. Волков. – Л. : [б. и.], 1971. – 57 с.
15. Становление отечественной гражданской авиации (1923–1929 гг.) [Электронный ресурс] // Студопедия. – Режим доступа: https://studopedia.ru/1_44309_stanovlenie-otchestvennoy-grazhdanskoj-aviatsii--gg.html – Дата доступа: 26.10.2023.
16. Международная конвенция воздушных передвижений: подписана в Париже 13 окт. 1919 г. / Гл. упр. гражд. воздуш. флота при СНК СССР. – М. : Ред.-изд. отд. Аэрофлота, 1935. – 119 с.
17. Вопросы воздушного права : сб. тр. Секции воздуш. права Союза Авиахим СССР и Авиахима РСФСР : [в 2 вып.] / Союз Авиахим СССР и Авиахим РСФСР; под ред. П. И. Баранова [и др.]. – М. : Авиахим, 1927. – Вып. 1. – 298 с.
18. Вопросы воздушного права : сб. тр. Секции воздуш. права Союза Авиахим СССР и Авиахима РСФСР : [в 2 вып.] / Союз Авиахим СССР и Авиахим РСФСР; под ред. П. И. Баранова [и др.]. – М. : Авиахим, 1930. – Вып. 2. – 233 с.
19. Перетерский, И. С. Воздушное право / И. С. Перетерский. – Изд. 2-е, испр. и доп. – М. : Журн. «Вестн. воздуш. флота», 1923. – 140 с.
20. Воздушный кодекс Союза ССР [Электронный ресурс]: утв. постановлением ЦИК СССР № 36, СНК СССР № 460, 22 апр. 1932 г. // КонсультантПлюс. Россия / ЗАО «КонсультантПлюс». – М., 2023.
21. Об утверждении Воздушного кодекса Союза ССР [Электронный ресурс]: постановление ЦИК СССР № 14, СНК СССР № 1713, 7 авг. 1935 г. // КонсультантПлюс. Россия / ЗАО «КонсультантПлюс». – М., 2023.
22. Об утверждении Воздушного кодекса Союза ССР [Электронный ресурс]: Указ Президиума Верхов. Совета СССР, 26 дек. 1961 г. // КонсультантПлюс. Россия / ЗАО «КонсультантПлюс». – М., 2023.
23. Об утверждении Воздушного кодекса Союза ССР [Электронный ресурс]: Указ Президиума Верхов. Совета СССР, 11 мая 1983 г., № 9275-X // КонсультантПлюс. Россия / ЗАО «КонсультантПлюс». – М., 2023.
24. Приказ Главнокомандующего ВВС от 3 июля 1985 г. № 161 Москва.
25. Об утверждении и введении в действие Наставления по производству полетов в гражданской авиации СССР (НПП ГА-85) [Электронный ресурс]: приказ М-ва гражд. авиации СССР, 8 апр. 1985 г., № 77 // КонсультантПлюс. Россия / ЗАО «КонсультантПлюс». – М., 2023.
26. Международное воздушное право: в 2 кн. / Акад. наук СССР, Ин-т государства и права; отв. ред. А. П. Мовчан. – М. : Наука, 1980–1981.

REFERENCES

1. Popov Yu. V. Rassledovanie aviacionnyh proisshhestvij – bezopasnost' poletov v istoricheskoj retrospektive [Investigation of aviation accidents - flight safety in historical retrospect]. Problemy bezopasnosti poletov, 2012, no. 1, pp. 4–22.
2. Konvencija o mezhdunarodnoj grazhdanskoj aviatsii: OOO «YurSpektr», Nac. centr pravovoj inform. Resp. Belarus' [Convention on International Civil Aviation], available at: <http://ilex : inform. pravovaya sistema, Nac. centr pravovoj inform. Resp. Belarus', Minsk, 2023>.
3. Rukovodstvo po predotvrashcheniyu aviacionnyh proisshhestvij [Guidelines for the prevention of aviation accidents], 1th ed., Montreal, ICAO, 1984, available at: https://sparcatc.ru/files/ICAO_Doc-9422-Rukovodstvo-po-predotvrashcheniyu-aviacionnyh-proisshhestvij.pdf (accessed 27.03.2023).
4. Rukovodstvo po upravleniyu bezopasnost'yu poletov [Flight safety management manual], 4th ed., Montreal, ICAO, 2018, available at: <https://e.eruditor.one/file/2992363/> (accessed 27.03.2023).
5. Prilozhenie 19 k Konvencii o mezhdunarodnoj grazhdanskoj aviatsii. Upravlenie bezopasnost'yu poletov [Annex 19 to the Convention on International Civil Aviation. Flight safety management], 2th ed., Montreal, ICAO, 2016, available at: https://caa.gov.kz/storage/app/media/%D0%B4%D1%83%D0%B1%D0%BF/AN19_cons_RU.pdf (accessed 27.03.2023).
6. Global'nyj plan obespecheniya bezopasnosti poletov [Global Flight Safety Plan], 2023–2025, doc. 10004, available at: https://www.icao.int/Meetings/a41/Documents/10004_ru.pdf (accessed 27.10.2023).
7. Rukovodstvo po nepreryvnomu monitoringu v ramkah Universal'noj programmy proverok organizacii kontrolya za obespecheniem bezopasnosti poletov [Guidance on continuous monitoring within the framework of the Universal Safety Oversight Audit Program], doc. 9735 AN/960, 3th ed., Montreal, 2011, available at: https://aerohelp.ru/sysfiles/374_252.pdf (accessed 27.10.2023).
8. Rukovodstvo po organizacii kontrolya za obespecheniem bezopasnosti poletov. Chast' V. Sozdanie regional'noj organizacii po kontrolyu za obespecheniem bezopasnosti poletov i upravlenie etoj organizaciej [Guidelines for organizing flight safety oversight. Part V. Creation of a regional organization for the control of flight safety and management of this organization], doc. 9734 AN/959, 2th ed., Montreal, ICAO, 2011, available at: https://aerohelp.ru/sysfiles/374_250.pdf (accessed 27.10.2023).
9. Benzhamen R. Bezopasnost' poletov i aviacionnaya bezopasnost' ostayutsya glavnymi prioritetami [Elektronnyj resurs], ICAO Journal, 2010, vol. 65, no. 2, available at: https://www.icao.int/publications/DownloadButton/6502_ru.pdf (accessed 26.10.2023).
10. Soglasenie o grazhdanskoj aviatsii i ob ispol'zovanii vozdushnogo prostranstva [Agreement on civil aviation and the use of airspace], available at: <https://ilex : inform. pravovaya sistema, Nac. centr pravovoj inform. Resp. Belarus', Minsk, 2023>.
11. O prisoedinenii Respubliki Belarus' k Chikagskoj konvencii o Mezhdunarodnoj grazhdanskoj aviatsii [On the accession of the Republic of Belarus to the Chicago Convention on International Civil Aviation], 9 dek. 1992 g., no. 2022-XII, Konsul'tantPlyus. Belarus', Nac. centr pravovoj inform. Resp. Belarus', Minsk, 2023.
12. Vozduhoplavanije i aviatsiya v Rossii do 1907 g. : sb. dok. i materialov [Aeronautics and aviation in Russia until 1907: collection. doc. and materials]. Ed. V. A. Popova. Moscow, Oborongiz, 1956, 952 p.
13. Rukovodstvo po parashyutno-spatatel'noj podgotovke grazhdanskoj aviatsii : RPSP GA-86 [Guide to parachute rescue training for civil aviation: RPSP GA-86: approved]. Moscow, Vozdushnyj transport, 1987, 63 p.
14. Volkov M. M. Upravlenie v oblasti grazhdanskoj aviatsii SSSR: ucheb. posobie [Management in the field of civil aviation of the USSR]. Leningrad, 1971, 57 p.
15. Stanovlenie otechestvennoj grazhdanskoj aviatsii (1923–1929 gg.) [Formation of domestic civil aviation (1923–1929)], available at: https://studopedia.ru/1_44309_stanovlenie-otchestvennoy-grazhdanskoj-aviatsii--gg.html (accessed 26.10.2023).
16. Mezhdunarodnaya konvencija vozdushnyh peredvizhenij : podpisana v Parizhe 13 okt. 1919 g. [International Air Traffic Convention: signed in Paris on October 13. 1919]. Moscow, Aeroflot, 1935, 119 p.
17. Voprosy vozdushnogo prava: sbornik trudov Sekcii vozdushnogo prava Sojuza Aviahim SSSR i Aviahima RSFSR. 1-2 iss. Moscow, Aviahim, 1927, 2 iss., 298 p.
18. Voprosy vozdushnogo prava: sbornik trudov Sekcii vozdushnogo prava Sojuza Aviahim SSSR i Aviahima RSFSR. 1-2 iss. Moscow, Aviahim, 1930, 2 iss., 233 p.
19. Pereterskij I. S. Vozdushnoe pravo [Air law]. Moscow, Zhurnal "Vestnik Vozdushnogo Flota", 1923, 140 p.
20. Vozdushnyj kodeks Soyuza SSR [Air Code of the SSR Union]. Konsul'tantPlyus. Rossiya, Moscow: Konsul'tantPlyus, 2023.
21. Ob utverzhenii Vozdushnogo kodeksa Soyuza SSR: postanovlenie CIK SSSR № 14, SNK SSSR № 1713, 7 avg. 1935 g. [On approval of the Air Code of the USSR]. Konsul'tantPlyus, Rossiya, Moscow: Konsul'tantPlyus, 2023.
22. Ob utverzhenii Vozdushnogo kodeksa Soyuza SSR: Ukaz Prezidiuma Verhov. Soveta SSSR, 26 dek. 1961 g. [On approval of the Air Code of the USSR]. Konsul'tantPlyus, Rossiya, Moscow: Konsul'tantPlyus, 2023.
23. Ob utverzhenii Vozdushnogo kodeksa Soyuza SSR: Ukaz Prezidiuma Verhov. Soveta SSSR, 11 maya 1983 g., № 9275-H [On approval of the Air Code of the USSR]. Konsul'tantPlyus, Rossiya, Moscow: Konsul'tantPlyus, 2023.
24. Prikaz Glavnokomanduyushchego voenno-vozdushnyh sil, 03.07.1985, № 161, Moscow.
25. Ob utverzhenii i vvedenii v dejstvie Nastavleniya po proizvodstvu poletov v grazhdanskoj aviatsii SSSR (NPP GA-85) [On the approval and entry into force of the Manual on flight operations in civil aviation of the USSR]. Prikaz Ministerstva grazhdanskoj aviatsii SSSR, 08.04.1985, № 77, Moscow: Konsul'tantPlyus, 2023.
26. Mezhdunarodnoe vozdushnoe pravo [International air law]. Ed. A. P. Movchan, Moscow, Nauka, 1980–1981.

*Статья поступила в редакцию
31.10.2023*

Уважаемые авторы, приглашаем к публикации!



Какие преимущества дает публикация в научно-практическом журнале «Авиационный вестник»?

- Допуск к защите диссертации;
- публикация в издании, зарегистрированном ВАК Республики Беларусь;
- повышение рейтинга в академическом и научном сообществах;
- возможность участия в научных дискуссиях с профессионалами;
- создание положительного имиджа исследователя;
- возможность продвинуться вверх по карьерной лестнице.



ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

ГЕНДЕРНЫЙ АСПЕКТ УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

GENDER ASPECT OF MANAGEMENT IN THE HIGHER EDUCATION SYSTEM

Казак Тамара Владимировна – доктор психологических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной психологии и эргономики учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Республика Беларусь
kazak@bsuir.by

Tamara Kazak – Doctor of Psychological Sciences, Professor, Head of the Department of Engineering Psychology and Ergonomics of the educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics", Republic of Belarus
kazak@bsuir.by

Шаталова Виктория Викторовна – кандидат технических наук, доцент, директор учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» филиал «Минский радиотехнический колледж», Республика Беларусь
shatalova@bsuir.by

Victoria Shatalova – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Director of the educational institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics" branch "Minsk Radio Engineering College", Republic of Belarus
shatalova@bsuir.by

Аннотация: в работе рассмотрены вопросы развития управленческого потенциала женщин-руководителей в системе внутривузовского управления, определены особенности и обосновывается возможность использования женского управленческого труда, представлен исторический и гендерный аспект представительства женщин в образовании и науке, а также гендерный аспект управления в сфере высшего профессионального образования.
Ключевые слова: гендер, управление человеческими ресурсами, женщины-руководители, профессиональная компетентность, психологический профотбор, личностные качества руководителя.

Abstract: the paper presents the issues of the development of the managerial potential of women managers in the system of intra-university management are considered, the features are identified and the possibility of using women's managerial work is justified, the historical and gender aspect of women's representation in education and science is presented, as well as the gender aspect of management in the field of higher professional education.
Keywords: gender, human resource management, female managers, professional competence, psychological professional selection, personal qualities of a manager.

Введение

Производственная среда, здравоохранение и медицина, транспорт и логистика, сельское хозяйство и прочие отрасли претерпевают существенные изменения из-за повсеместного внедрения информационных технологий и систем. Физические миры машин и агрегатов превратились в киберфизические системы, где объектами физического мира управляют инструкции машинного кода. Хайтек-стратегия «Индустрия 4.0» или «Четвертая промышленная революция» — это уже не абстрактный бренд, а ряд современных технологий, связанных с автоматизацией, обменом данными и производства. И как бы мы не стремились к миру машин, влияние человека все равно будет иметь место [1].

Человеческий фактор оказывает значительное влияние на результаты работы в любой, в т. ч. технической системе, но особенно важен он в интеллектуальной деятельности по управлению коллективами людей. Наиболее актуальными представляются исследования

личностных качеств, «человеческого фактора» руководителя с учетом того, что в сфере управления встречается все больше женщин. Исследованию особенностей женского управленческого труда посвящена настоящая статья.

Представительство женщин в образовании и науке

Вопрос «человеческого фактора» как в профессиональной деятельности, так и в организации труда появился еще на рубеже XIX и XX веков. Особое внимание к этому понятию появилось в 20-х годах XX столетия как в отечественной, так и в зарубежной научной литературе в контексте проблем психологической профессиографии, психологического профотбора (психотехники) и научной организации труда.

Исследователями психологических особенностей процесса управления многократно предпринимались попытки выделить специфические личные качества

руководителя, т. е. такие особенности поведения, которые присущи только ему, а другим работникам не свойственны. Это позволило показать, какие именно личностные характеристики человека являются для руководителя наиболее значимыми. Хотя у разных авторов эти перечни и имеют отличия, они не противоречат, а дополняют друг друга. Это объясняется тем, что руководителю в идеале должны быть присущи все лучшие человеческие качества, а перечень их неисчерпаем. Именно поэтому исследования разных авторов представляют в данном случае интерес [2]. Дж. Блэк отмечает, что руководителю позволят достойно занимать свое место в структуре управления организационное и административное упорство, стойкость, честолюбие, здравый смысл, способность планировать, умение общаться с людьми и понимать людей, знание дела, смелость. Р. Бейси отмечает такие качества, как жизнеспособность и опять же стойкость, решимость (желание и умение решать), умение убеждать, не бояться ответственности, незаурядное умственное развитие. В. Баменьский наряду с интеллектуальными качествами, способностью разбираться в людях и принимать решения, подчеркивает важность быстроты реакции, опыта, внимательности, общей теоретической подготовки, высокого морального уровня, энергичности, инициативы, гражданского мужества, умения поддерживать у окружающих хорошее настроение, неподверженности внушению, такта и некоторых других [2].

Проведенные психодиагностические обследования современных руководителей показали, что для них характерны следующие качества:

- волевой, способный преодолевать препятствия;
- настойчив, умеет разумно рисковать, терпелив, может выполнять и скучную работу;
- инициативен, предпочитает работать без мелочной опеки, независим;
- психологически устойчив, не дает увлечь себя нереальными идеями;
- хорошо приспосабливается к новым условиям и требованиям;
- самокритичен, трезво оценивает свои успехи и неудачи;
- требователен к себе и к другим, умеет спросить за порученную работу;
- критичен, умеет видеть в заманчивых предложениях подчиненных слабые места;
- надежен, держит слово, на него можно положиться;
- вынослив, может работать в условиях перегрузок;
- восприимчив к новому, умеет решать нетрадиционные задачи оригинальными методами и путями;
- стрессоустойчив, не теряет самообладания и работоспособен в экстремальных условиях;
- оптимистичен, относится к трудностям как к неизбежным, но преодолимым помехам;
- решителен, способен самостоятельно и своевременно принимать решения в критической ситуации, брать ответственность на себя;
- способен менять стиль поведения в зависимости от условий, может строго спросить с подчиненного, может и ободрить в трудную минуту.

З. Мошна и С. Черны выделяют такие качества, значение которых возрастает по мере продвижения руководителя по служебной лестнице: понимание людей, готовность к сотрудничеству; рассудительность,

объективность, умение принимать решения; способность к управлению, коммуникабельность; энергичность и самодисциплина; общественные связи; уравновешенность характера [2].

Анализ изменений, происходящих в современном кадровом менеджменте, показывает, что соотношение количества мужчин и женщин на управленческих должностях стремительно изменяется. Традиционный взгляд на мир и порядок вещей подвергается сегодня серьезным трансформациям в силу различных процессов, происходящих в экономике, политике, социальной сфере, культуре. Одним из таких изменений можно назвать появление в образовательных учреждениях принципа гендерного равенства.

В последние десятилетия влияние гендерных различий на профессиональную деятельность, и прежде всего психологические особенности поведения женщин в организациях, стали объектом специальных исследований, что обусловлено динамичным значительным преобладанием женщин в управлении организациями.

По данным Генерального секретаря Межпарламентского союза Андерса Джонсона, в настоящее время женщины занимают около 19 % всех депутатских мест в мире. Среди глав государств всего девять представительниц слабого пола [3]. В парламентах арабских стран женщины составляют 16 %, в Саудовской Аравии только 20 женщин-парламентариев, а в декабре 2015 года впервые женщина была избрана депутатом муниципального совета. Более 40 % женщин-депутатов насчитывается в парламентах Кубы, Швеции, ЮАР, Сенегала, Финляндии, Эквадора, Никарагуа, в Соединенных Штатах Америки — 19,3 %, а в Евросоюзе в среднем процент работающих в парламентах женщин составляет 24,2 %. Только в парламенте Андорры царит полное равноправие полов. В России доля женщин среди парламентариев составляет 14 %, в Узбекистане — 22 %.

На протяжении последних десятилетий Республика Беларусь добилась значительного прогресса в области развития человеческого потенциала и высокого уровня гендерного равенства в обществе. Доля женщин в Республике Беларусь на начало 2021 года составила 53,78 % населения страны [4]. По результатам парламентских выборов 2019 года представленность женщин в Национальном собрании Республики Беларусь возросла до 35,1 % от общей численности депутатов Палаты представителей и членов Совета Республики (по сравнению с предыдущем созывом — 34,7 %, в начале 2000 года — 18,4 %). В местных Советах депутатов женщины составляют более 48 %. Стабильным остается удельный вес женщин-руководителей в общей численности руководителей — на уровне 50 %. Женщины широко представлены в государственном управлении — государственные служащие всех уровней управления составляют более 50,8 %, в т. ч. в должностях руководителей организаций и их заместителей более 47,8 %. Среди руководителей в возрасте от 20 до 49 лет женщины составляют 50,6 %, из них 60,6 % имеют несовершеннолетних детей [5].

Происходящие в стране социально-экономические преобразования и существенные изменения общественных отношений в производственной среде, здравоохранении и медицине, транспорте и логистике, сельском хозяйстве и прочих отраслях деятельности приводят к пересмотру научных подходов развития управленческого потенциала женщин в тех сферах про-

фессиональной деятельности, которые традиционно считаются «женскими», одна из таких сфер деятельности — образование.

Несмотря на то, что женщины в профессии учителя, преподавателя преобладают количественно, общая структура занятости женщин в этой сфере имеет форму пирамиды: чем выше социальный статус должности, тем меньше на этих должностях женщин; чем выше уровень управления, тем меньше представительство женщин. Соотношение мужчин и женщин в учреждениях высшей школы зависит от ряда факторов, которые условно можно разделить на экономические, социально-психологические, социально-политические и социокультурные.

К экономическим факторам относятся: экономическая ситуация в стране, потребность общества в дополнительной высококвалифицированной рабочей силе в лице женщин, уровень территориальной и профессиональной мобильности, общий уровень научно-технического развития. К социально-психологическим факторам — мотивация мужчин и женщин к профессиональной деятельности в данной сфере, престиж профессии, приверженность женщин к занятости в условиях стабильности и минимального риска в бюджетной сфере, привычка работать в данной сфере. К социально-политическим факторам — государственная политика, уровень законодательства в стране. К социокультурным факторам — национальные особенности, социокультурные традиции [6].

В настоящее время доля женщин в возрасте от 25 до 49 лет с высшим образованием составляет 39,4 %, мужчин — 28,1 %, что приводит к увеличению численности женщин в науке и в высшей школе. На начало 2020 года ученую степень, звание доктора наук, профессор имели 120 женщин, (21,5 %); кандидат наук, доцент — 1126 человек (41,4 %), тенденция изменения соотношения по годам показана на рисунке. Гуманитарные науки постепенно стали «женскими», а вслед за ними увеличение численности женщин произошло и в технических науках, и в таких отраслях знания, как медицина, биология, химия, инженерия, ИТ-сфера.

Однако во всех отраслях и профессиях, где женщины составляют абсолютное большинство, прослеживается вертикальная сегрегация по признаку пола, которая выражается в доминировании мужчин на высоких уровнях управления, где больше власти, дополнитель-

ных льгот и высоких зарплат. Даже в такой феминизированной отрасли, как образование, доля женщин последовательно снижается при переходе к более высоким должностным позициям.

В учреждениях высшего образования вертикальное разделение прослеживается еще более отчетливо: численность профессорско-преподавательского состава учреждений высшего образования на конец 2012 года приведена в таблице; на конец 2018 учебного года женщины в числе ректоров вузов составили всего 9,6 %, на уровне проректоров, директоров филиалов 22,4 %, деканы, и заместители деканов 36,2 %, заведующие кафедрами 38 %, профессора в составе кафедр 23,5 %, в то же время, чем ниже занимаемые должности, тем больше доля женщин на них. Так, среди старших преподавателей — 64,1 % женщин, среди преподавателей, ассистентов, преподавателей-стажеров — 66,6 %. Небольшая разница в соотношении занимаемой должности доцента между женщинами (52,2 %) и мужчинами (47,8 %), которая наиболее гендерно-симметрична по сравнению с другими вузовскими должностями [7].

Историю женщин в системе высшего образования можно разделить на пять этапов. Особенности первого этапа (1860—1910) являются интенсификация деятельности женщин за право получения высшего образования; появление первых женщин среди студентов учреждений высшего образования; становление высшего женского образования в условиях господства патриархальных взглядов; право получения высшего образования носило сословно-дискриминационный характер; ограничение перечня специальностей для женщин.

Для второго этапа (1920—1940) характерны следующие признаки: образование рассматривается как неперемное условие равенства полов; принятие законодательных актов, устанавливающих полное равенство мужчин и женщин в получении образования и выборе профессии; введение 25-процентной квоты для женщин на рабфаках высших технических учебных заведений и целевых направлений.

Третий этап (1950—1980) характеризуется следующими особенностями: отмена квотирования мест для женщин; равный доступ женщин и мужчин ко всем видам образования; увеличение штатного персонала УВО и научных учреждений; гендерная асимметрия в должностной структуре учреждений образования.

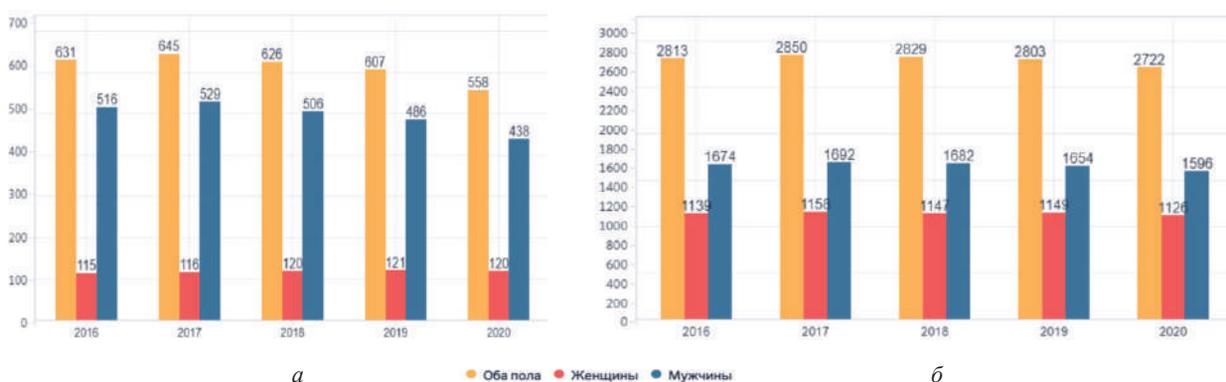


Рисунок — Численность женщин Республики Беларусь, имеющих научную степень по всем областям наук: а — доктор наук; б — кандидат наук [10]

Таблица – Численность профессорско-преподавательского состава учреждений высшего образования на конец 2012 года [9]

Показатель	Женщины		Мужчины		Распределение по полу, %	
	человек	процент к итогу	человек	процент к итогу	женщины	мужчины
Численность профессорско-преподавательского состава, всего*:	12 921	100,00	11 003	100,00	54,00	46,00
Ректоры	3	0,02	49	0,50	5,80	94,20
Проректоры, директора филиалов	60	0,50	180	1,60	25,00	75,00
Деканы факультетов, заместители деканов	260	2,00	453	4,10	36,50	63,50
Заведующие кафедрами	621	4,80	1 189	10,80	34,30	65,70
Профессоры в составе кафедр	272	2,10	1 069	9,70	20,30	79,70
Доценты в составе кафедр	3 314	25,70	3 557	32,30	48,20	51,80
Старшие преподаватели	4 018	31,30	2 285	20,80	63,70	36,30
Преподаватели, ассистенты, преподаватели-стажеры	4 373	33,80	2 221	20,20	66,30	33,70

*Штатный персонал

Особенностями четвертого этапа (1990–1999) являются снижение престижа профессии, снижение финансирования высшего образования, массовый отток мужчин из учебных заведений.

Пятый этап (2000 – по настоящее время) характеризуется следующими особенностями: модернизация системы образования; изменение роли современных руководителей учреждений системы высшего образования; усиление феминизации в данной сфере; тенденция увеличения доли женщин на внутривузовских управленческих должностях: заведующие кафедрами, деканы факультетов, проректоры, директора филиалов, ректоры [6].

Стиль управления

Особенность представленности женщин в системе управления учреждений высшего образования заключается в том, что они, занимая, как правило, низовые управленческие позиции в УВО (заместители деканов, заместители заведующих кафедрами и т. п.), берут на себя гораздо больший груз ответственности по управлению внутренней жизнью учреждения образования, что гораздо сложнее, чем управление внешними связями.

При этом женский стиль руководства вполне соответствует современным условиям и востребован в условиях инноваций, социальной ориентации экономических реформ, человеко-ориентированности. Женщины с присущим им историческим статусом созидательниц добра, заботы и справедливости способны справиться с задачами участия в управлении достаточно эффективно. Существуют ли на самом деле отличия мужского и женского стиля управления? Когда-то было принято говорить, что нет мужского или женского стиля управления, есть профессионалы и непрофессионалы. Но гендерные различия все же существуют.

По мнению психолога Е. П. Ильина [8], для мужчин-руководителей характерны низкий уровень коммуникации и эмпатии. Они консервативны и проявляют агрессию. Женщины более склонны к сочувствию, социальному партнерству, успешно объединяют кол-

лектив и мотивируют сотрудников на выполнение сложных задач. Мужскому стилю управления свойственна большая структурированность, предсказуемость и определенность. Они чаще ориентируются на задачу и результат, рассчитывают и планируют. Менее склонны к переменам, с трудом отказываются от своей точки зрения, менее эмоциональны, не доверяют интуиции и чувствам. По устоявшимся стереотипам им свойственно доминировать, быть суровее, требовательнее, соревноваться и не уступать.

Мужчины-руководители непримиримее в проведении своей линии, быстрее впадают в ярость, ярче проявляя агрессию и неуступчивость. Они держат большую дистанцию с подчиненными, чем женщины-руководители. Верят в себя и свои достижения больше и меньше нуждаются в одобрении своих действий.

Женщины больше ориентируются на людей, которые будут выполнять задачу. Им свойственно работать над выстраиванием отношений и творческим процессом, а также стремление к развитию, самопознанию, приобретению новых навыков. Женщина-руководитель чаще демонстрирует дружелюбный стиль руководства: старается больше доверять мнению подчиненных; выстраивать командные отношения, создавать творческую атмосферу. Она умеет быть дипломатичной великодушной, склонна достигать результат через выстраивание отношений.

Мужчины часто не принимают во внимание мнение сотрудников и не поощряют инициативность, но в то же время чаще используют либеральный стиль руководства, пускают процесс управления на самотек, отказываясь от контроля и дисциплины.

Наиболее распространенным стилем управления женщин-руководителей является демократический стиль. Он характеризуется коллегиальным принятием решений, делегированием полномочий и установлением партнерских отношений в коллективе.

Возросший спрос на рабочую силу, развитие менеджмента до уровня академической дисциплины, включенной в университетские программы, а также усилившаяся организационная дифференциация (создание

подразделений маркетинга, общественных связей, развитие трудовых ресурсов) — все эти факторы способствовали включению женщин в сферу управления. Активная интеграция женского стиля управления, характерная для настоящего времени, подтверждает актуальность гендерных исследований.

Решение проблемы формирования и развития индивидуальной профессиональной карьеры с учетом гендерных особенностей требует специальных знаний и научных подходов. Несмотря на то, что исследования гендерных проблем управления в сфере высшего образования представляют собой довольно заметный тематический срез в современных социально-экономических науках, вопросы системного формирования, реализации и развития управленческого потенциала

женщин-руководителей в высших учебных заведениях не получили глубокой научной и практической проработки.

Заключение

На современном этапе развития системы образования, в условиях ее феминизации и существующей гендерной асимметрии в составе студенчества и профессорско-преподавательского состава все более актуальным становятся анализ и выявление гендерных особенностей формирования, использования и развития управленческого потенциала женщин-руководителей в высших учебных заведениях, адекватно, глубоко и точно отражающие сложившуюся ситуацию.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кибербезопасность цифровой индустрии. Теория и практика функциональной устойчивости к кибератакам / под ред. профессора РАН, доктора технических наук Д. П. Зегжды. – М.: Горячая линия – Телеком, 2020. – 560 с: ил.
2. Князев, С. Н. Управление: искусство, наука, практика : учеб. пособие / С. Н. Князев. – Минск : Армита – Маркетинг, Менеджмент, 2020. – 512 с.
3. Щёткина, М. А. Гендерная политика в Беларуси разбивает стеклянный потолок» в общественном сознании [Электронный ресурс] / Национальный правовой интернет-портал Pravo.by. – Режим доступа: <https://pravo.by/index.php> – Дата доступа: 28.12.2021.
4. Беларусь в цифрах. Статистический справочник. [Электронный ресурс] / Национальный статистический комитет РБ. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by> – Дата доступа: 28.12.2021.
5. Национальный план действий по обеспечению гендерного равенства в Республике Беларусь на 2021-2025г. [Электронный ресурс]; постановление Совета Министров Республики Беларусь, 30.12.2020, №793 / Национальный правовой интернет-портал Pravo.by. – Режим доступа: <https://pravo.by/index.php> – Дата доступа: 28.12.2021.
6. Макарова, С. Н. Женщины-руководители в системе внутривузовского управления: проблемы, возможности и перспективы: моногр. / С. Н. Макарова, С. Д. Резник. – Пенза : ПГУАС, 2014. – 180 с.
7. Мужчины и женщины Республики Беларусь. Статистический сборник. [Электронный ресурс] / Национальный статистический комитет РБ. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by> – Дата доступа: 28.12.2021.
8. Ильин, Е. П. Пол и гендер / Е. П. Ильин. – СПб.: Питер, 2010. – 688 с.
9. Гендерное равенство в сфере высшего образования: пути и средства достижения/ И. Н. Кандричина [и др.] ; науч. ред.: В. Г. Шадурский, Л. С. Лукина. – Минск : Юнипак, 2016. – 54 с.
10. Гендерная статистика и статистика отдельных групп населения. [Электронный ресурс] / Национальный статистический комитет РБ. – Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by> – Дата доступа: 28.12.2021.

REFERENCES

1. Kiberbezopasnost' cifrovoj industrii. Teorija i praktika funkcional'noj ustojchivosti k kiberatakam [Cybersecurity of the digital industry. Theory and practice of functional resistance to cyber attacks]. Ed. D.P. Zegzdy. Moscow, Gorjachaja linija – Telekom, 2020, 560 p.
2. Knjazev S.N. Upravlenie: iskusstvo, nauka, praktika [Management: art, science, practice]. Minsk, Armita – Marketing, Menedzhment, 512 p.
3. Shhjtokina, M.A. Gendernaja politika v Belarusi razbivaet stekljannij potolok» v obshhestvennom soznanii [Gender policy in Belarus breaks the glass ceiling" in public consciousness], available at: <https://pravo.by/index.php> (accessed 12.28.2021).
4. Belarus' v cifrah. Statisticheskij spravocnik [Belarus in numbers. Statistical reference book], available at: <https://www.belstat.gov> (accessed: 12.28.2021).
5. Nacional'nyj plan dejstvij po obespečeniju gendernogo ravenstva v Respubliki Belarus' na 2021-2025g., postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus', 30.12.2020, №793 [The national plan of action for gender equality in the Republic of Belarus for 2021-2025. the resolution of Council of Ministers of the Republic of Belarus, 30.12.2020, No. 793], available at: <https://pravo.by/index.php> (accessed: 28.12.2021).
6. Makarova S. N., Reznik S.D. Zhenshhiny-rukovoditeli v sisteme vnutrivuzovskogo upravlenija: problemy, vozmozhnosti i perspektivy [Women leaders in the system of university management: challenges, opportunities and prospects]. Penza, Penzenskij gosudarstvennyj universitet arhitektury i stroitel'stva, 2014, 180 p.
7. Muzhchiny i zhenshhiny Respubliki Belarus'. Statisticheskij sbornik [Men and women of the Republic of Belarus. Statistical collection], available at: <https://www.belstat.gov.by> (accessed: 28.12.2021).
8. Il'in E.P. Pol i gender [Sex and gender]. Saint Petersburg, Piter, 2010, 688 p.
9. Kandruchina I. N. et al. Gendernoe ravenstvo v sfere vysshego obrazovaniya: puti i sredstva dostizheniya [Gender equality in higher education: ways and means of achievement] Eds.: V. G. Shadursky, L. S. Lukina. Minsk, Unipak, 2016, 54 p.
10. Gendernaja statistika i statistika otdel'nyh grupp naselenija [Gender statistics and statistics of individual population groups], available at: <https://www.belstat.gov.by> (accessed: 28.12.2021).

*Статья поступила в редакцию
19.10.2023*

ИЛЛЮЗИИ КАК ОСОБЕННОСТИ ПСИХИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЛЕТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ АВИАЦИОННОГО ПЕРСОНАЛА

ILLUSIONS AS FEATURES OF MENTAL PROCESSES IN THE FLIGHT ACTIVITY OF AVIATION PERSONNEL

Машарский Захар Владимирович – кандидат психологических наук, декан факультета гражданской авиации учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
dism@mail.ru

Zakhar Masharsky – Candidate of Psychological Sciences, Dean of the Faculty of Civil Aviation of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
dism@mail.ru

Аннотация: в деятельности летного состава в процессе пространственной ориентировки возникает целый ряд постоянно повторяющихся, искаженных и неправильных отражений внешних и внутренних условий деятельности – иллюзий. Они возникают практически у всех пилотов и могут значительно усложнить полет.

Ключевые слова: воздушное судно, иллюзии полета, авиационная иллюзиология, летный состав, пространственная ориентировка.

Abstract: in the activity of flight personnel in the process of spatial orientation, a number of constantly recurring, distorted and incorrect reflections of external and internal conditions of activity – illusions arise. They occur in almost all pilots and can significantly complicate the flight.

Keywords: aircraft, flight illusions, aviation illusiology, flight crew, spatial orientation.

Введение

Иллюзии – это ошибки различных уровней отражения (восприятия, мышления, памяти и т. д.). Они сопровождают все виды деятельности человека. В летной деятельности иллюзии проявляются в пространственной ориентировке, без которой невозможно эффективное передвижение воздушных судов в пространстве.

Пространственная ориентировка – базовая функция человеческой деятельности, и от того, насколько эффективно эта функция осуществляется, напрямую зависят и все остальные результаты той или иной деятельности, в том числе безопасность полета. При этом пространственная ориентировка является психическим процессом, постоянно осуществляющимся в любой деятельности и практически в любых условиях, направленным на формирование и поддержание образа пространственного положения, движения, состояния и динамики различных параметров, описывающих это положение и движение. Пространственная ориентировка – это непрерывный процесс определения человеком своего положения в пространстве, изменения этого положения в пространстве и перемещения в нем [1].

Основная часть

Актуальность исследования многочисленных иллюзий полета не вызывает сомнения, т. к. практически каждая из выявленных иллюзий может являться причиной потери пространственной ориентировки (дезорientировки) летного состава в полете с последующим возникновением инцидентов, аварий и катастроф. Иллюзиями в широком смысле называют искаженные отражения внешней и внутренней деятельности человека. Они возникают практически у всех пилотов и могут значительно усложнить полет. По мнению летного состава, некоторым ошибочным действиям пилотов, повлекшим за собой тяжелые последствия, могли предшествовать иллюзии, которые, в свою очередь, привели к дезориентировке пилотов. Иллюзии – это патология пространственной ориентировки, практическая значимость которой в летной деятельности исключительно велика.

Среди причин, обусловленных ошибками летчика, нарушения пространственной ориентировки составляют от 5 % до 12 %, а удельный вес потери пространственной ориентировки среди причин летных катастроф достигает 20 %. При этом следует подчеркнуть, что уровень аварийности по этим причинам в течение десяти-

летий не уменьшается. Более того, анализ практически 50-летнего периода полетов показал, что дезориентировка в пространстве была и остается одной из основных причин авиационных происшествий и катастроф.

Результатом исследования иллюзий во время полетов стало новое психологическое направление — авиационная иллюзиология. Она базируется и включает многочисленные исследования отечественных и зарубежных авторов. На данный момент предметом авиационной иллюзиологии являются 154 иллюзии пространственного положения и движения, возникающие у летчиков, штурманов и бортинженеров, эксплуатирующих государственные и гражданские воздушные суда в разных условиях, этапах и режимах полетов. Также в рамках авиационной иллюзиологии была предложена восьмипозиционная схема (название иллюзии, ее описание, встречаемость, длительность, влияние на безопасность полетов, причины и условия, психологические и психофизиологические механизмы, действия в полете, при возникновении иллюзии и после полета) по которой были описаны 154 иллюзии полета [2]. Применение этой схемы оказало важнейшее влияние на становление авиационной иллюзиологии как нового научного направления.

Определены следующие основания для классификации иллюзий: этапы полета, параметры полета, время суток и время года, режим полета (визуальный или приборный), профессия (пилоты, штурманы и т. д.), функциональные системы (анализаторы, органы чувств), для которых характерны те или иные иллюзии, типы иллюзий (индивидуальные или групповые), ответственность различных уровней переработки информации, вид метеоусловий и т. д. Перечень подвидов по этой классификации приводится ниже.

Проведенный анализ показал, что иллюзии у пилотов могут возникать на следующих одиннадцати этапах полета:

- при движении летательного аппарата по аэродрому;
- на разбеге;
- на взлете;
- при наборе высоты;
- на маршруте;
- при снижении до высоты круга;
- при выполнении прямоугольного маршрута;
- при заходе на посадку;
- на выравнивании;
- на посадке;
- на висении (для вертолетов);
- при пробеге.

Пилотажно-навигационный параметр — это часть летной ситуации, которая имеет единицы, диапазон и систему измерения и используется пилотом для точной пространственной ориентации.

Традиционно положение и движение летательного аппарата в пространстве в основном характеризуется следующими пилотажно-навигационными параметрами:

- крен;
- тангаж (кабрирование, пикирование);
- скорость;
- высота;
- вертикальная скорость подъема (снижения);
- скольжение;
- курс;

- дальность;
- разворот.

Этот перечень не исчерпывает всего объема пилотажно-навигационных параметров, например, функционирования различных систем самолета. Однако предварительные исследования и анализ литературы показали, что иллюзии пространственного положения и движения возникают у пилотов наиболее часто при работе именно с перечисленными выше параметрами. Поэтому они использованы в нашей работе в качестве оснований для классификации.

Было установлено, что иллюзии возникают у летного состава в разное время суток и время года. Причем некоторые иллюзии возникают только в определенное время. Например, иллюзия звездного окружения (впечатление, что кругом звезды) может возникнуть у пилотов только в условиях ночного полета, а иллюзия сноса самолета во время метели (кажущийся снос самолета в противоположную сторону в метель, когда снежная масса относится ветром поперек взлетно-посадочной полосы) может возникнуть у пилота только зимой. Поэтому основаниями классификации иллюзий могут быть время суток и года.

Авиационной иллюзиологией впервые сформулированы положения о том, что:

- в авиации иллюзии будут являться причинами авиационных происшествий до тех пор, пока не будет построена и внедрена в отечественную авиацию система профилактики иллюзий, включающая информационное, методическое, тренажерное, организационное, компьютерное и другое обеспечение;
- ни летчики у себя, ни инструкторы у летчиков, даже в педагогических целях, не смогут просто так, без соответствующего научно-методического и соответствующего технического обеспечения вызвать иллюзии.

Предложен подход, который впервые позволил моделировать зрительные иллюзии полета в лабораторных условиях. Он базируется на разрабатываемой теории ограничений (диапазонов, правил), концепции параметризации летной информации [3] и концепции автоматичности принятия решений и включает новые методики моделирования зрительных иллюзий в лабораторных условиях. Суть данного подхода заключается в том, что человек надежно и эффективно осуществляет свою жизнедеятельность только в рамках определенных органических, физиологических, психологических, информационных, эргономических, гигиенических, педагогических, социальных, экономических и многих других ограничений (диапазонов, правил), выход за которые сопровождается ошибками представлений (иллюзий) и действий.

Авиационная иллюзиология способствовала разработке содержательно-инвентаризационного подхода и в его рамках опросно-графического реконструктивного метода, что является переломным этапом не только в авиационной, но и в общей психологии. Указанный подход и метод позволяют выявлять предметное содержание деятельности людей и этим самым открывают дорогу к разработке категории предметности и к созданию научно обоснованных, непридуманных требований к средствам профессиональной деятельности и эффективным методам и средствам обучения [4].

Основной авиационной иллюзиологией является установленная формула иллюзий: «принятие кажущегося

за действительное и использование его в умственной и практической деятельности людей». Помимо указанного, иллюзии выполняют защитную, информационно-замещающуюся, конструктивную, побуждающую и другие функции.

Отражение (восприятие, мышление, память и т. д.), неадекватное законам природы и человеческого общества, являющееся ошибочным, чаще всего обозначается как заблуждения, обман, иллюзии, свойственно всем без исключения видам деятельности и профессиям и приносит огромный вред человечеству. В каждой профессии предпринимаются попытки анализа ошибок познавательной сферы специалистов, однако эти попытки разрознены и не имеют методологической и методической основы, что делает эту работу неэффективной, а люди, как показывает опыт авиационной иллюзиологии, самостоятельно не могут выявить и предотвратить пагубное действие иллюзий на свою жизнедеятельность [5].

В русле авиационной иллюзиологии указанные просчеты уже устранены, ее методологический и методический каркас может и должен использоваться при становлении других составляющих общей иллюзиологии.

Заключение

В настоящее время наметились следующие перспективы развития авиационной иллюзиологии:

1. Создание компьютерного варианта опросно-графического реконструктивного метода и проведение с его помощью широкомасштабных исследований летчиков отечественных и зарубежных авиакомпаний для выявления тех летчиков, которые, находясь под властью иллюзии подвижности пространства и управления землей, видят землю подвижной по крену и тангажу и тем самым являются потенциально опасными (дезориентируемыми) и для себя, и для пассажиров.

2. Проведение работ по замене «прямой» индикации на смешанную с последующими исследованиями возможности индикации тангажа по принципу «вида с земли на ВС», что приведет к решению авиагоризонтной проблемы.

3. Внедрение новых методов в практику профотбора, а «Методику обучения стабилизации пространства полета по крену и тангажу» в практику обучения летного состава.

4. Разработка процедурных тренажеров по обучению летного состава преодолению иллюзий полета.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Коваленко, П. А. Иллюзии полета (Авиационная делиалогия). Методические рекомендации / П. А. Коваленко, В. А. Пономаренко, А. В. Чунтул. – М.: Динамика, 2005. – 376 с.
2. Коваленко, П. А. Учение об иллюзиях полета. Основы авиационной делиалогии / П. А. Коваленко. – М.: 2007. – 461 с.
3. Козлов, В. В. Человеческий фактор: история, теория и практика в авиации / В. В. Козлов. – М.: Полиграф, 2002. – 280 с.
4. Платонов, К. К. Основы авиационной психологии: учеб. для сред. спец. учеб. заведений гражданской авиации / К. К. Платонов, Б. М. Гольдштейн. – М.: Транспорт, 1987. – 222 с.
5. Макаров, Р. Н. Авиационная педагогика: учебник / Р. Н. Макаров – Москва-Кировград: МНАПЧАК, 2005. – 433 с.

REFERENCES

1. Kovalenko P. A., Ponomarenko V. A., Chuntul A. V. Illuzii poleta (Aviacionnaja delialogija). Metodicheskie rekomendacii [Illusions of flight (Aviation delialogy). Methodological recommendations]. Moscow, Dinamika, 2005, 376 p.
2. Kovalenko P. A., Ponomarenko V. A., Chuntul A. V. Uchenie ob illuzijah poleta. Osnovy aviacionnoj delialogii [The doctrine of illusions of flight. Fundamentals of aviation dialogue]. Moscow: Institut psihologii Rossijskoj akademii nauk, 2007, 461 p.
3. Kozlov V.V., Chelovecheskij faktor: istorija, teorija i praktika v aviacii [Human factor: history, theory and practice in aviation]. Moscow, Poligraf, 2002, 280 p.
4. Platonov K. K., Goldstein B. M. Osnovy aviacionnoj psihologii [Fundamentals of aviation psychology]. Moscow, y Transport, 1987, 222 p.
5. Makarov, R. N. Aviacionnaja pedagogika [Aviation pedagogy]. Moscow-Kirovograd, Mezhdunarodnaja akademija problem cheloveka v aviacii i kosmonavtike, 2005, 433 p.

*Статья поступила в редакцию
17.10.2023*

ЭРГОНОМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ИНТЕРФЕЙСОВ ПРОГРАММНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

ERGONOMIC EVALUATION CRITERIA USER INTERFACES OF SOFTWARE APPLICATIONS

Казак Тамара Владимировна – доктор психологических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной психологии и эргономики учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Республика Беларусь
kazak@bsuir.by

Tamara Kazak – Doctor of Psychological Sciences, Professor, Head of the Department of Engineering Psychology and Ergonomics of the educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics", Republic of Belarus
kazak@bsuir.by

Василькова Анастасия Николаевна – магистр, старший преподаватель кафедры инженерной психологии и эргономики учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Республика Беларусь
a.vasilkova@bsuir.by

Anastasia Vasilkova – Master's Degree Student, Senior Lecturer of the Department of Engineering Psychology and Ergonomics of the Educational Institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics", Republic of Belarus
a.vasilkova@bsuir.by

Аннотация: в данной статье обобщены исследования по оценке наборов измерений удобства использования программного обеспечения эргономических критериев. Авторы приводят итоги исследовательской работы по оценке комплекса программного обеспечения в целях измерения удобства использования. В статье содержится описание каждого такого критерия. Все вместе они призваны обеспечивать качественный пользовательский интерфейс. В результате исследований выявлены противоречия в вопросах эргономики и идей разработчиков. Успех решения этой проблемы – в нахождении консенсуса между функционалом программного обеспечения и эргономикой интерфейса, другими словами, юзабилити пользователя. **Ключевые слова:** юзабилити интерфейса, эргономика интерфейса, критерии оценки эргономических показателей интерфейсов.

Abstract: this article summarizes research evaluating sets of software usability measurements of ergonomic criteria. The authors present the results of research work on evaluating a software package in order to measure usability. The article contains a description of each such criterion. Together they are designed to provide a high-quality user experience. As a result of the research, contradictions were identified in issues of ergonomics and the ideas of developers. The success of solving this problem lies in finding a consensus between the functionality of the software and the ergonomics of the interface, in other words, user usability. **Keywords:** interface usability, interface ergonomics, criteria for assessing ergonomic indicators of interfaces.

Введение

Век цифровой трансформации и автоматизации человеческой деятельности использование технических устройств стало повседневной обыденностью. Это позволяет расширить или дополнить такие естественные возможности, как сложные вычисления, передача и получение информации, улучшение точности, перемещение в пространстве, принятие решений и многое другое.

Целью данной работы является определение основного набора показателей простоты использования, обычно известные как «эргономические критерии»,

основанные на обзоре уже написанных исследовательских работ. Исследование касается процесса проектирования эффективного пользовательского интерфейса как результата взаимного понимания разработчика и пользователя задач и действий с программным обеспечением [1].

Обоснование набора эргономических критериев оценки

Каждый программный продукт представляет собой набор различных функций. Это предоставляет пользователям различные элементы управления. Поэтому не-

обходимо иметь стандарты оценки технологий и пользовательских интерфейсов (англ. — user interface) — UI. Очевидно, что UI напрямую зависит от задачи, которую решает программное приложение (ввод и вывод данных и пр.). Однако все эти компоненты могут быть представлены пользователю в различных формах и форматах. Успех решения задачи при разработке программных приложений зависит от того, насколько функционален, понятен и удобен интерфейс.

Если интерфейс заставляет пользователей совершать ошибки, то этот интерфейс плохо продуман, по крайней мере, хуже, чем интерфейс, который помогает избежать подобных ошибок. На процесс проектирования пользовательского интерфейса наибольшее влияние оказывают собственное восприятие дизайнером ясности, удобства, красоты. Поэтому очень важно оценить качество пользовательского интерфейса. Проведение таких оценок на ранних стадиях процесса проектирования позволяет избежать многочисленных ошибок, просчетов, отклонений программного приложения со стороны конечного пользователя.

Есть различные способы оценить качество пользовательского интерфейса.

Процесс оценки включает этапы определения требований к качеству. Другими словами, интерфейс программного продукта может оцениваться на основе различных стандартов, показателей качества и атрибутов интерфейса. Хотя оценка качества пользовательского интерфейса достаточно субъективна и ее сложно формализовать, можно с уверенностью сказать, что хороший интерфейс должен обеспечивать эффективность и продуктивность работы пользователя.

Рассмотрим определенные рекомендации, которым необходимо следовать и опираться на них для проектирования пользовательского интерфейса с учетом потребностей и ожиданий пользователей:

1. Полезность, удобство использования, желание работать — три аспекта, которые должны лежать в основе разработки любого программного обеспечения [5, 6].

2. Отображение реального мира в пользовательском интерфейсе. Разработчик должен попытаться отразить язык и концепции, которые пользователи используют в реальном мире, в зависимости от их принадлежности к целевой аудитории. Предоставление логически структурированной информации и удовлетворение ожиданий пользователей от их реального опыта значительно снизит когнитивную нагрузку и облегчит использование программного продукта.

3. Стандарты и последовательность. Разработчики пользовательского интерфейса должны обеспечить выполнение условных стандартов как для графических элементов, так и для терминологии. Например, значок, представляющий одну категорию или концепцию, не должен обозначать другую концепцию, если она используется несколько раз в программе или на сайте.

4. Эффективность и гибкость. По мере увеличения частоты использования возникает потребность в меньшем количестве взаимодействий, которые обеспечивают более быструю навигацию и простоту использования. Этого можно достичь с помощью функциональных клавиш, команд, закрепленных за комбинацией клавиш, макросов. Хорошим решением было бы позволить пользователям настраивать или адаптировать интерфейс к своим потребностям, чтобы частые действия

могли выполняться с помощью более удобных для пользователя инструментов.

5. Понимание. Человеческая память и внимание ограничено, и мы можем хранить в нашей кратковременной памяти лишь несколько предметов (не более 7). Из-за этих ограничений дизайнерам необходимо проектировать интерфейс так, чтобы пользователи могли просто использовать распознавание фрагментов информации вместо запоминания. Распознать что-то всегда легче, чем запоминать, потому что узнавание предполагает восприятие сигналов, которые помогают нам проникнуть в нашу долговременную память и позволяют связать образы и понять их.

6. Документация и ссылки. В идеальном программном продукте пользователи ориентируются в системе, не прибегая к документации. Однако, независимо от типа решения, документация все равно необходима. Когда пользователям нужна помощь, важно легко ее найти. Документация должна быть оформлена таким образом, чтобы она направляла пользователей к выполнению необходимых шагов для решения проблемы, с которой они сталкиваются.

7. Предотвращение ошибок. При проектировании разработчики стремятся свести к минимуму возможные ошибки. Обычный пользователь не должен выявлять и устранять проблемы с приложением, которые могут выходить за рамки их возможностей. Это уровень тестировщиков. Устранение или пометка действия, которые могут привести к ошибкам, — это два возможных способа предотвращения ошибок.

8. Свобода действий пользователя. Хорошее решение — создать цифровое пространство, где пользователь может делать шаги назад, включая отмену и повтор предыдущих шагов.

9. Состояние системы. Важно информировать пользователей о текущем состоянии программного приложения. Есть различные варианты для решения проблемы, которая возникает при таких операциях как «загрузка», «поиск», «восстановление» или др. Легко понятное и четко видимое состояние должно отображаться на экране в течение разумного периода времени, т. е. периода времени, пока система находится в соответствующем состоянии.

10. Минимализм. Цель этого аспекта — свести к минимуму беспорядок в интерфейсе. Вся ненужная информация конкурирует за ограниченные ресурсы внимания пользователя, что может помешать поиску актуальной информации. Поэтому экранное пространство должно быть ограничено необходимыми компонентами для текущих задач, обеспечивая при этом четко видимые и однозначные средства перехода к другому контенту [2, 3].

Несмотря на достаточное количество работ по вопросам разработки эргономичных пользовательских интерфейсов, отсутствие однозначных стандартов и разнообразие рекомендаций приводят к тому, что существует проблема восприятия эргономики программного обеспечения как науки в неоднозначности и стадии развития. Однако, активные исследования в этой области уже позволили сделать много полезных выводов относительно факторов, влияющих на эффективность использования программного обеспечения. Как показывает опыт, многие интерфейсы неудовлетворительны [6–8]. Это связано с тем, что они слишком уз-

копрофильны и требуют фиксированной комбинации пользовательских навыков. Хороший интерфейс должен обслуживать разные группы пользователей. Это один из главных вопросов проектирования эргономичных интерфейсов.

Рассмотрим некоторые важные вопросы в процессе проектирования эффективных интерфейсов.

Первое, это построение модели активности пользователя. Эта структура может помочь в получении оценки безошибочности, показателей потребления ресурсов и вариантного анализа альтернатив методов обработки данных [7]. Второе, мы можем выделить человеко-ориентированный и компьютерно-ориентированный подходы к разработке пользовательских интерфейсов. Однако любой из этих подходов должен быть результатом анализа задач пользователя. Из принципов эргономики [5] можно понять, почему современное программное обеспечение не может использоваться достаточно продуктивно в контексте разнообразных и неструктурированных заданий. Рассматривая типичные современные программные продукты, мы выявили некоторые недостатки, такие как:

1. Слабая интеграция. Чтобы получить желаемые результаты, конечным пользователям часто приходится совмещать работу нескольких приложений. Каждое приложение имеет свои собственные требования к формату данных. Обычно это требует ручного вмешательства пользователя. Например, с помощью текстового редактора вывести данные из одной программы в определенный формат ввода для другой. Другая проблема заключается в том, что как только данные были импортированы, их структура часто теряется. Каждая программа и сама операционная система имеют свои собственные требования к форматам данных и режимам их импорта. Некоторые программы имеют несколько режимов, которые требуют от пользователя не только соответствующих знаний, но и понимания нужного режима текущего приложения. Это является высокой когнитивной нагрузкой, следовательно, источником ошибок.

2. Потеря контекста. В ходе выполнения задачи пользователь попадает в ситуацию, когда требуется получить данные, которые сразу недоступны. Их необходимо получить каким-то образом вне контекста текущей задачи. Многие системы переключаются только тогда, когда ожидаемая задача переходит в состояние ожидания. Возможно, вместо того, чтобы приостанавливать такую задачу, ее следует закрыть. Это означает, что контекст части незавершенной задачи теряется, и пользователь должен явно вернуть ее при восстановлении.

3. Непонятность. Точные формы или форматы данных, необходимые для команд или функций программы, часто приходится искать в огромных и сложных для понимания руководствах.

4. Синдром швейцарского армейского ножа. Многие функции программного продукта могут дублировать с различными названиями идентичные функции, такие как электронная почта, поиск, письмо (поиск), архивирование (хранение), составление письма (редактирование) и т. д. Такие функции на самом деле являются похожими версиями гораздо более общих функций, которые могут применяться к одному конкретному контексту. Это может привести к большому и необоснованному дублированию функциональности и повышенной

противоречивости, вызывающей постоянную опасность путаницы в понимании логики пользовательского интерфейса.

Может показаться, что недостатки были намеренно созданы с целью недопущения пользователей к эффективному использованию технологий. Однако разработчики никогда намеренно не создают интерфейсы для повседневного использования с недостатками. Недостатки конструкции выявляются в ходе реальных испытаний, которые обнаруживают виды использования, неучтенные должным образом на этапе проектирования. Недостатки — это неучет чего-либо, а намеренные затруднения использования функционала. Исключением могут быть программные продукты, предназначенные для научных целей для изучения влияния этих недостатков на пользователей.

Наличие подобных недостатков накладывает на пользователя большую когнитивную нагрузку. Это отвлекает его от реальной задачи, которую необходимо выполнить. В результате появляются многочисленные ошибки пользователей. Особенно это касается рутинных задач, в которых компьютеры легко превосходят людей. Люди начинают совершать ошибки из-за падения фокуса внимания при выполнении повторяющихся задач. Но значительная часть усилий по использованию компьютеров в качестве интеллектуального инструмента — это задача без интеллектуального содержания. Например, форматы преобразования данных. Текущая ситуация вынуждает пользователей постоянно тратить большую часть внимания на низкоуровневых аспектах общения.

Ошибки в большинстве случаев — это просто «глупые» ошибки, вызывающие раздражение и потерю времени, но не причиняющие большого вреда. Однако время от времени хорошо понятная ошибка пользователя обходится дорого, вызывая неправильные результаты или потерю большого объема работы, или даже необратимую потерю информации, которая причиняет большие затруднения [3, 4]. Даже без таких проблем общее время работы пользователей может тратиться на угадывание или попытки выяснить что-то довольно тривиальное. Эти «неизбежные» ошибки неизбежны только потому, что простейшие принципы эргономики не применяются к дизайну пользовательского интерфейса. Важным условием хорошего интерфейса является следующее:

1. Система представляется пользователю интегрированной системой с единым интерфейсом, а не набором различных интерфейсов, по одному для каждой отдельной функции системы, даже если каждый отдельный интерфейс хорошо продуман. Это, в свою очередь, требует, чтобы в системе была единая концептуальная основа: вся система — это единый концепт и структура, в которую естественным образом могут быть интегрированы различные программы.

2. Хороший дизайн пользовательского интерфейса делает взаимодействие пользователя с приложением или сайтом простым, интуитивно понятным, эффективным. Плохой пользовательский интерфейс может раздражать или мешать пользователям продолжать работу. Например, в качестве раздражающего фактора часто встречается обязательная регистрация и авторизация на ресурсах, которыми пользователи могут пользоваться однократно. Например, доставка цветов, заказ сто-

лика в ресторане — опыт говорит о том, что люди часто предпочитают пробовать новое, и нет необходимости ради однократной услуги проходить процедуру регистрации и авторизации, а потом отписываться от спама.

Еще один распространенный паттерн неудачного интерфейса — кнопки или иконки переключения языков отображения. Использование иконок флагов — не очень удачное решение ввиду того, что возможно некорректное отображение на черно-белом экране. Наиболее удачной является идея использования интуитивно понятных обозначений — значок глобуса.

Немаловажным фактором при проектировании эффективных и эргономичных интерфейсов является выбор правильных инструментов для работы и отображения их компонентов.

Общеизвестно, что основой проектирования интерфейса является выбор правильного инструмента для работы. Обычно это должно означать следующее: внимание к общепринятым символам и использование знакомых элементов управления. Например, для выбора нескольких опций использовать переключатели в виде квадратиков или использовать кнопки «плюс» и «минус», которые позволяют пользователю настроить количество желаемых опций по своему выбору.

3. Обход двусмысленностей. Для начала стоит отметить, что пользователи привыкли сами ставить «галочки» вместо удаления уже выбранных. Однако в данном случае проблема интерфейса заключается в неоднозначности толкования понятий. Чтобы удалить ингредиент по порядку, нужно снять флажок или оставить его? Эта путаница вводит пользователя в заблуждение и вызывает ряд недоразумений.

4. Чрезмерный выбор вариантов. Раскрывающиеся списки для выбора из множества элементов не являются хорошим решением. Пользователю гораздо проще, например, ввести год своего рождения, чем листать длинный список по годам. Лучше использовать списки и предложить пользователю вводить данные с клавиатуры самостоятельно, и только потом, согласно введенной комбинации, предлагать слова или символы для примера вариантов заполнения.

5. Размывание контента. Чтобы узнать всю историю компании, пользователю необходимо зайти на пять разных веб-страниц, хотя гораздо эргономичнее было бы сформировать всю концепцию компании в одной странице. Такое разрежение контента в разных разделах заставляет пользователя «блуждать» в интерфейсе и, как

следствие, тратить лишнее время. Разработчикам в этом случае следует расширить содержимое одной страницы «О программе» / «О компании» за счет содержимого вложенных дочерних страниц так, чтобы пользователь, посетив этот сайт, получил полную информацию о компании, не совершая ненужные переходы на страницах.

Заключение

Проблема проектирования пользовательских интерфейсов в настоящее время актуальна. Поэтому для облегчения работы с программным продуктом разработчикам необходимо продумать и создать эргономичный пользовательский интерфейс, который соответственно выполнил бы все возложенные на него задачи. В этой статье доказывается важность эргономичного интерфейса, преимущества хорошего пользовательского интерфейса, такие как снижение общей стоимости системы, поддержка или редизайн, значительное снижение количества человеческих ошибок при использовании программного продукта.

Учитывая потребности и ожидания пользователя от дизайна интерфейса, необходимо учитывать рекомендации, которые следует принять во внимание и включить в этапы процесса проектирования пользовательского интерфейса. К ним относятся понятная документация и советы по использованию, с помощью которых разработчики пользовательского интерфейса могут игнорировать свободу действий пользователя, основанную на цифровом пространстве. Также рекомендуется прибегнуть к минимализму, который включает в себя определение основных функций интерфейса и устранение загроможденных скоплений компонентов, ненужных для текущих задач. Эти рекомендации и советы являются основой для определенных критериев.

В статье содержится характеристика оценки качества программного обеспечения, а именно обобщаются критерии эргономичности пользовательского интерфейса на основе обзора уже написанных научных публикаций. Все на следующие общие группы: функциональность, надежность, юзабилити, эффективность, мобильность.

Эргономические критерии должны учитывать возможные ошибки пользователей. Поэтому, эргономичные приложения должны быть интерактивными, интуитивно понятными, прерываемыми, «нисходятельными» к ошибкам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Казак, Т. В. Технологические и психологические аспекты разработки интерфейсов. Прикладные вопросы точных наук: материалы V Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, преподавателей (АМТИ, г. Армавир, Россия) / Т. В. Казак, Н. И. Потапенко, А. Н. Василькова. – Армавир : РИО АГПУ, 2022 – 374 с.
2. Penha, M. Ergonomic Evaluation of Usability with Users – Application of the Technique of Cooperative Evaluation [Электронный ресурс] / M. Penha [at al.]. – Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2013. – Режим доступа: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-642-39229-0_41.pdf. – Дата доступа: 15.10.2023.
3. Semerikov, S. Sustainability in software development. education: the case of general professional competencies [Электронный ресурс] / S. Semerikov [at al.]. – Proceedings of the XXI International Conference on Sustainable Future: Environmental, Technological, Social and Economic Issues, volume 166. – Режим доступа: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/26/e3sconf_icsf2020_10036.pdf. – Дата доступа: 15.10.2023. (<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016610036>).
4. Fernandez, J. Heuristic-Based Usability Evaluation Support: A Systematic Literature Review and Comparative Study [Электронный ресурс] / J. Fernandez, J. Marias // Proceedings of the XXI International Conference on Human-Computer Interaction, September 202. – N. 23, P. 1–9. – Режим доступа: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3471391.3471395>. – Дата доступа: 15.10.2023. (<https://doi.org/10.1145/3471391.3471395>).
5. Human Interface Guidelines [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://developer.apple.com/design/human-interface-guidelines>. – Дата доступа: 15.10.2023.
6. Khan, Md. A. M. Agent-Based Ergonomic User Interface Development Environment: Analysis Phase [Электронный ресурс] / Md. Abdul Muqit Khan // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJTEE). – 2019. – Vol. 9. – P. 1406–1410. – Режим доступа: <https://www.ijtee.org/wp-content/uploads/papers/v9i1/A3997119119.pdf>. – Дата доступа: 15.10.2023. <https://doi.org/10.35940/ijtee.A3997.119119>.
7. Yamaoka, T. Evaluating User Interface Design Using Hierarchical Requirements Extraction Method (REM). In: Stephanidis, C., Antona, M. (eds) Universal Access in Human-

Computer Interaction. Design Methods, Tools, and Interaction Techniques for elnclusion [Электронный ресурс] / Т. Yamaoka // UAHCI, 2013. Lecture Notes in Computer Science, vol. 8009. Springer, Berlin, Heidelberg. – Режим доступа: <https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluating-User-Interface-Design-Using-Hierarchical-Yamaoka/72d26417f2c25533f7125ba432d440f7941fac2a>. – Дата доступа: 15.10.2023. (https://doi.org/10.1007/978-3-642-39188-0_15).

8. Руководство по обеспечению доступности веб-контента (WCAG) 2.0 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.w3.org/Translations/WCAG20-ru>. – Дата доступа: 15.10.2023.

REFERENCES

1. Kazak T.V., Potapenko N.I., Vasil'kova A.N. Tehnologicheskie i psihologicheskie aspekty razrabotki interfejsov [Technological and psychological aspects of interface development] Prikladnye voprosy tochnyh nauk. Materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii studentov, aspirantov, преподаvatelej. Armavir, Armavirskij gosudarstvennyj pedagogicheskij universitet, 2022, 374 p.
2. Penha M., Correia W., Soares M., Campos F. and Barros M. Ergonomic Evaluation of Usability with Users – Application of the Technique of Cooperative Evaluation. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2013. 8012 LNCS 379 – 388, available at: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-642-39229-0_41.pdf (accessed 15.10.2023).
3. Semerikov S., Stryuk A., Stryuk L., Stryuk M. and Szalacka H. Sustainability in software development. education: the case of general professional competencies. Proceedings of the International Conference on Sustainable Future: Environmental, Technological, Social and Economic Issues, vol. 166, available at: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/26/e3sconf_icsf2020_10036.pdf (accessed 15.10.2023) (<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016610036>).
4. Fernandez J. and Marias J. Heuristic-Based Usability Evaluation Support: A Systematic Literature Review and Comparative Study. Proceedings of the XXI International Conference on Human-Computer Interaction, September 2021, Article no. 23, pp. 1-9, available at: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3471391.3471395> (accessed 15.10.2023) (<https://doi.org/10.1145/3471391.3471395>).
5. Human Interface Guidelines, available at: <https://developer.apple.com/design/human-interface-guidelines> (accessed 15.10.2023).
6. Khan Md. Abdul Muqsit Agent-Based Ergonomic User Interface Development Environment: Analysis Phase. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). 2019, vol. 9, pp. 1406-1410, available at: <https://www.ijitee.org/wp-content/uploads/papers/v9i1/A3997119119.pdf> (accessed 15.10.2023) <https://doi.org/10.35940/ijitee.A3997119119>.
7. Yamaoka T. Evaluating User Interface Design Using Hierarchical Requirements Extraction Method (REM). Eds. Stephanidis, C., Antona, M. Universal Access in Human-Computer Interaction. Design Methods, Tools, and Interaction Techniques for elnclusion. UAHCI, 2013. Lecture Notes in Computer Science, vol. 8009. Springer, Berlin, Heidelberg, available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluating-User-Interface-Design-Using-Hierarchical-Yamaoka/72d26417f2c25533f7125ba432d440f7941fac2a> (accessed 15.10.2023) (https://doi.org/10.1007/978-3-642-39188-0_15).
8. Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.0, available at: <https://www.w3.org/Translations/WCAG20-ru> (accessed 15.10.2023).

*Статья поступила в редакцию
24.10.2023*

ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СТАТЬЯМ ДЛЯ ОПУБЛИКОВАНИЯ

К публикации в журнале принимаются оригинальные, достоверные и обоснованные материалы, которые имеют научное и практическое значение, отличаются актуальностью и новизной.

Объем текста статьи должен составлять не менее 14 000 печатных знаков, но не превышать 40 000 печатных знаков (8–16 стр.). Рукописи большего объема принимаются только по специальному решению редакционной коллегии.

Статья должна быть выполнена в текстовом редакторе MS Word и отредактирована строго по следующим параметрам: ориентация листа — книжная, формат А4, поля по 2 см с каждой стороны, шрифт Times New Roman, кегль (для всей статьи кроме аннотации, ключевых слов и таблиц) — 14 пт, для таблиц — 12 пт, для аннотации и ключевых слов — 10 пт, междустрочный интервал — 1,5, выравнивание по ширине страницы, абзацный отступ — 1,25 см (без использования клавиш «Tab» или «Пробел»). Выделения в тексте возможны только полужирным шрифтом и (или) курсивом. Внутренние подзаголовки необходимо центрировать.

Статья должна иметь следующую структуру:

1. УДК (номер тематической рубрики). Индекс статьи по Универсальной десятичной классификации набирается обычным шрифтом, с выравниванием по левому краю.

2. Название статьи. Должно содержать до 12 слов. Не допускается использовать в названии аббревиатуры и формулы. Набирается прописными буквами, начертание — полужирное, прямое без разбиения слов переносами, с выравниванием по центру строки, без абзацного отступа, без точки в конце. Рекомендуется, чтобы в названии статьи использовались ключевые слова.

3. Инициалы и фамилия автора (авторов) с обязательным указа-

нием организации аффилирования (места работы). Инициалы и фамилия автора набираются прописными буквами, с выравниванием по правому краю строки, без абзацного отступа, без точки в конце. Через запятую перечисляются все соавторы. После названия статьи указывается фамилия, имя и отчество (полностью) автора, ученая степень, ученое звание, должность и организация аффилирования (место работы) автора, страна, адрес электронной почты. Аналогичные данные всех соавторов указываются с новой строки.

4. Аннотация (авторское резюме) объемом 150–250 слов должна кратко представлять результаты работы и быть понятной, в том числе и в отрыве от основного текста статьи; должна быть информативной (не содержать общих фраз, общеизвестных положений), хорошо структурированной (один из вариантов написания аннотации — краткое повторение структуры статьи, включающее введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение или выводы). Текст должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, исторических справок, если они не составляют основное содержание рукописи. Следует избегать сокращений и условных обозначений, кроме общеупотребительных, ссылки на литературные источники не приводятся.

5. Ключевые слова должны содержать 5–10 слов или 3–5 словосочетаний, которые отделяются друг от друга запятой. Ключевые слова должны отражать содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования.

6. Метатекстовые данные (информация, указанная в пунктах 2–5) в той же последовательности приводится на английском языке.

Если статья англоязычная — вышеуказанные данные приводятся на русском языке.

7. Основной текст статьи может включать рисунки и таблицы (до 7–8).

Таблицы набираются в редакторе MS Word. Таблицы должны иметь номера и названия, которые должны быть указаны над таблицами. Единственная таблица в публикации не нумеруется. Исползованные в таблице сокращения подлежат расшифровке в конце таблицы.

Графический материал (рисунки, чертежи, схемы, диаграммы, фотографии) должны представлять собой обобщенные материалы исследований. Не допускается составление рисунка из разрозненных элементов. Графический материал должен размещаться сразу после его первого упоминания в тексте, а также должен быть предоставлен в виде отдельных файлов в формате .jpg/ .png/ .cdr/ или .psd (Adobe Photoshop, без склеивания слоев) с разрешением не ниже 300 dpi). Желательно также предоставлять графические материалы в формате оригинала (Corel, диаграммы в Excel, Origin Pro и т. д.), т. е. в той программе, в которой они выполнены. Текст на рисунках набирается основной гарнитурой, причем начертание символов (греческое, латинское) должно соответствовать их начертанию в тексте. Все надписи, обозначения на всех графиках, рисунках, схемах должны быть достаточно крупными, легко читаемыми, выполненными одинаковым шрифтом. Размер кегля соизмерим с размером рисунка (кегель — не менее 8 пт). Названия и номера графического материала должны быть указаны под изображением. Элементы рисунков и кривые нумеруются курсивными арабскими цифрами, которые расшифровываются в подрисуночных подписях. Единственный рисунок в статье не

нумеруется. График должен быть наглядным, иметь аккуратное и четкое исполнение, должен легко читаться, для чего необходимо соблюдать следующие правила: координатные оси должны заканчиваться стрелками или штрихами; оси должны быть подписаны с указанием единиц измерения. Не допускается выход рисунков за границы текста на поля. Все рисунки должны обеспечивать простое масштабирование с сохранением взаимного расположения всех элементов и внутренних надписей.

Формулы и математические символы. Простые формулы и буквенные обозначения величин нужно вставлять, используя меню «Вставка. Символ». Формулы набираются с помощью встроенного в MS Word редактора формул MathType. Шрифт Times New Roman, кегль: основной текст – 14 пт, индекс – 10 пт. Буквы (прописные и строчные) латинского алфавита, обозначающие физико-математические величины, набирают курсивом. Русские, греческие буквы, сокращенные тригонометрические и математические термины (sin, cos, tg, arcsin, ln, lg, lim, const, min, max и т. д.) набирают прямым шрифтом. Нумеруются только те формулы, на которые автор ссылается по тексту.

Иллюстрации, формулы и сноски следует нумеровать в соответ-

ствии с порядком цитирования в тексте.

Аббревиатуры. В тексте следует использовать только общепринятые сокращения (аббревиатуры). Полный термин, вместо которого вводится сокращение, следует расшифровать при первом упоминании его в тексте. Приводимые статистические данные, факты, цитаты, имена собственные и другие сведения должны быть обеспечены ссылками на источники. В тексте пишутся в квадратных скобках.

8. Список использованных источников должен включать в себя все работы, использованные автором в тексте, и оформлен на русском (белорусском) языке в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь (ГОСТ 7.1-2003). Цитируемая литература приводится общим списком по мере упоминания. Каждый источник должен иметь свой порядковый номер в списке.

Затем приводится список цитированных источников в романском алфавите (латиница) (References) со следующей структурой: авторы (транслитерация), название статьи в транслитерированном варианте [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках], название русскоязычного

источника (транслитерация) [перевод названия источника на английский язык], выходные данные с обозначениями на английском языке. Транслитерация русскоязычных названий выполняется согласно стандарту BSI.

Структура списка литературы на английском языке отличается от предписанной ГОСТом (ГОСТ 7.1-2003). При оформлении списка литературы на английском языке (References) для транслитерации кириллицы используйте систему Board of Geographic Names (BGN).

Тире, а также символ // в описании на английском не используются.

Перечисляются все авторы материала через запятую. Фамилия и инициалы транслитерируются. Инициалы от фамилии запятой не отделяются.

Названия книг, журналов, материалов конференций, сборников, авторефератов и диссертаций транслитерируются и переводятся.

Транслитерация набирается курсивом, перевод – в квадратных скобках [].

Названия статей (составных частей) из журналов, сборников и т. д., а также патентов, законов, ГОСТ, СНБ, ТКП, СНиП, СанПиН и т. д. только переводятся.

К печати принимаются статьи, отвечающие профилю журнала, не публиковавшиеся ранее в других изданиях.

Материал должен быть подписан всеми авторами.

Материалы, оформленные с нарушением требований или не прошедшие рецензирование (отклонены рецензентами) не публикуются.

Примеры оформления материалов статьи и транслитерации приведены на сайте bga.by.



РУБРИКИ ЖУРНАЛА

Технические науки

(проектирование и эксплуатация авиационной техники, навигация и управление воздушным транспортом, авиационная безопасность и безопасность полетов)

Педагогические науки

(профессиональная подготовка авиационных специалистов, развитие профессионального образования)

Юридические науки

(правовое регулирование в области гражданской авиации)

Психологические науки

(инженерная психология, эргономика, авиационная психология, человеческий фактор)

УСЛОВИЯ ОПУБЛИКОВАНИЯ В ЖУРНАЛЕ

Для опубликования статьи в журнале необходимо представить:

1. Экспертное заключение о возможности опубликования в открытых источниках печати в электронном виде в формате pdf (оригинальные экспертные заключения необходимо обязательно предоставить в оргкомитет).
2. Выписка из протокола заседания кафедры или иной научной структуры с рекомендацией к опубликованию материалов статьи в научно-практическом журнале «Авиационный вестник».
3. Статьи о результатах работ, проведенных в научных учреждениях, должны иметь разрешение на опубликование (сопроводительное письмо ректората или дирекции либо выписку из протокола заседания ученого совета, отдела или кафедры).
4. Анкету автора (форму можно посмотреть на сайте Академии/Наука и инновации/Журнал «Авиационный вестник».
5. Материалы статьи и сопроводительные документы представляются в электронном и письменном виде согласно установленным требованиям.
 - Электронную версию материалов присылать по адресу: avia.vestnik@bgaa.by. В названии файла указывать фамилию автора (либо соавторов через запятую) в именительном падеже, а также первые два-три слова из названия статьи.
 - Бумажный вариант статьи, подписанный всеми авторами (подписи должны быть заверены) направлять по адресу редакционной коллегии с пометкой «Научно-практический журнал «Авиационный вестник».

Языки материала статьи: белорусский, русский, английский.

Плата за публикацию не взимается.

Электронная версия журнала будет опубликована на сайте учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации».

bgaa.by

Журнал включен в перечень Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам (эксплуатация воздушного транспорта, навигация и управление воздушным транспортом) согласно приказу Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь № 94 от 01.04.2014 (в редакции приказа Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь 16.02.2021 № 36).

Журнал включен в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU

АДРЕС РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

220096, г. Минск, ул. Уборевича, 77

Учреждение образования «Белорусская государственная академия авиации»

Телефон: +375 (17) 354-32-34

e-mail: avia.vestnik@bgaa.by

Подписано в печать 26.12.2023. Формат 60x90/8. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 4,65. Тираж 100 экз. Заказ №2533

Отпечатано: ООО «НАВИТЕХ».

ЛП №02330/482 от 21.02.2017

220024, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Бабушкина, 6А, комн. 204.